



Fachbereich Luft- und Raumfahrttechnik

Lehr- und Forschungsgebiet
Thermodynamik und Verbrennungstechnik

Bachelorarbeit

**Realisierung einer Wärmeübergangsmessstrecke zur
Untersuchung von „Green Rocket Propellants“**

Nadine Stoll

Aachen, 26.11.2019

Referent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Esch

Korreferent: Marius Wilhelm M.Sc.

I. Bibliographische Angaben

Verfasser:	Nadine Stoll Matr.-Nr.: 3081669 11.06.1993 Öhringen
Titel:	Realisierung einer Wärmeübergangsmessstrecke zur Untersuchung von „Green Rocket Propellants“
Art der Arbeit:	Bachelorarbeit
Studiengang:	Luft- und Raumfahrttechnik Studienschwerpunkt: Triebwerkstechnik
Kooperation:	Fachhochschule Aachen Fachbereich Luft- und Raumfahrttechnik Lehrgebiet Thermodynamik und Verbrennungstechnik Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik e.V. Institut für Raumfahrtantriebe Langer Grund 74239 Hardthausen
Ausgabedatum:	24.09.2019
Abgabedatum:	26.11.2019
Schlagworte:	Grüne Treibstoffe; Wärmeübertragung; HyNOx; Regenerativkühlung

II. Aufgabenstellung

Für Satelliten- und Orbitalantriebe finden bisher vorwiegend das giftige und karzinogene Hydrazin oder Hydrazinderivate (MMH, UDMH) Anwendung. Diese Stoffe sollen zukünftig durch sogenannte „Grüne Treibstoffe“ (engl. „Green Propellants“) ersetzt werden, die -bei vergleichbaren Leistungscharakteristika- umweltverträglicher, problemloser in der Handhabung und kostengünstiger in der Herstellung sind. Treibstoffgemische aus Lachgas und Kohlenwasserstoffen zeigen als Hydrazinersatz großes Potential und werden daher sowohl vom DLR, als auch weltweit eingehend untersucht.

Durch die hohen Verbrennungstemperaturen von Lachgas-Kohlenwasserstoff-Gemischen, ist es notwendig die Wärmeübertragungsprozesse im Triebwerk, hier speziell in Düse und Brennkammer, gezielt zu untersuchen und eine regenerative Kühlung an die Anforderungen anzupassen.

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit soll eine Wärmeübergangsmessstrecke (WUMS) realisiert werden. Mit Hilfe dieser Anordnung sollen triebwerkstypische Temperaturbedingungen und Wärmeströme auf vereinfachte Kühlkanalmodelle (Messstrecken) aufgebracht werden, um thermodynamische und strömungsphysikalische Einflussparameter (Re , Pr , Nu , ROF , „sooting“) auf den Wärmeübergang und damit den Kühlprozess entkoppelt ermitteln zu können.

Neben der Einarbeitung in die Thematik von Lachgas- Kohlenwasserstofftriebwerken (als Monergol- und Diergolsysteme) und zu Regenerativkühlsystemen in Raketenschubkammern, soll zuerst eine Literaturrecherche zu umgesetzten bzw. existierenden Möglichkeiten der Nachbildung extremer thermischer Lasten (Raketen, etc.) durchgeführt werden. Hieran schließt sich die Suche und Beschaffung verfügbarer Hardware (Beheizung) bzw. fertigbare Sonderlösungen an.

Neben der Beheizungslösung wird sowohl die Fluidinfrastruktur, als auch elektrische (Ansteuerung, Regelung der Heizer) und die messtechnische Ausrüstung (Druck, Temperatur, Massenstrom) der WUMS anhand der HyNOx- Triebwerks (MkII) aufgebaut und in Betrieb genommen werden.

Ein weiterer Teil der Arbeit umfasst die Inbetriebnahme des Gesamtaufbaus.

Scope of Work

For satellite and orbital propulsion, the toxic and carcinogenic hydrazine and its derivatives (UDMH, MMH) are commonly used.

In the future, these substances are to be replaced by so called „Green Propellants“ which have comparable performance, but are more environmentally friendly, easier to handle and less expensive to manufacture. Mixtures of Nitrous Oxide and Hydrocarbons show great potential and are therefore investigated both by DLR and worldwide.

Due to the high combustion temperatures of nitrous oxide hydrocarbons mixtures it is necessary to determine the heat-fluxes in the engine, especially the nozzle and combustion chamber, to develop a regenerative cooling system that meets the requirements.

Within the scope of this Bachelor-thesis a heat-transfer testbed (WUMS) is to be realized. With the help of this setup, simplified cooling-channel models are to be subjected to temperature ranges and heat fluxes typical for space propulsion engines. This will allow the independent analysis of both thermodynamical as well as flow-physics properties and how they effect the heat transfer and consequently the cooling channel itself.

In addition to the topic of nitrous oxide and hydrocarbon engines (as monopropellant or bipropellant systems) and to regenerative cooling in rocket thrust chambers a literature study to existing possibilities of reproducing the extreme thermal loads (e.g. rockets) is carried out.

Furthermore available hardware or special solutions (heating) should be researched and procured.

In addition to the heating solution, the fluid infrastructure as well as the power supply (control and regulation of the heaters) and the measurement equipment of WUMS are built up and put into operation.

A further part of the work includes the commissioning of the entire set-up.

III. Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Wärmeübergangsmessstrecke zur Nachbildung von Wärmeübergängen in HyNOx-Triebwerken aufgebaut und in Betrieb genommen. Es wurde ein Verfahren entwickelt, mit welchem vergleichbare Wärmelasten auf eine vereinfachte Kühlkanalgeometrie (Messstrecke) realisiert werden können.

Dazu wurde der Kühlkanal durch ein Edelstahlrohr nachgebildet. Beheizt wurde die Messstrecke durch elektrische Heizer. Die Wärmeübertragung von den Heizern auf die Messstrecke erfolgte in Form von Wärmestrahlung. Versuche wurden mit einem Keramik- und einem Inconel-Heizer durchgeführt. Die von den Heizern aufgenommene Leistung wurde durch Strom- und Spannungsmessumformer ermittelt.

Die Versuche fanden in einer Vakuumkammer statt, um konvektive Wärmeverluste zu verhindern.

Zur Inbetriebnahme wurden Versuche mit Wasser und Stickstoff durchgeführt. Die beiden Stoffe sind ungefährlich und haben über einen weiten Temperaturbereich annähernd konstante thermo-physikalische Eigenschaften.

In der Messstrecke wurde die Temperatur des Fluids im Zu- und Ablauf über Thermoelemente gemessen. Der Massentrom wurde durch einen Coriolis-Durchflussmesser gemessen. Aus der Temperaturdifferenz und dem Massenstrom konnte kalorimetrisch die vom Fluid durch Konvektion aufgenommene Wärmemenge berechnet werden.

Weiterhin wurde ein Fluidsystem für Lachgas und Ethan aufgebaut und in Betrieb genommen. Es besteht aus jeweils einem Filter, einem Regelventil und einem Domdruckminderer. Dadurch können Massenstrom, ROF und Druck in der Messstrecke unabhängig voneinander eingestellt werden.

Abstract

In this thesis, a Heat-Transfer-Testbed was developed and commissioned for the simulation of heat transfers in HyNOx engines.

For this purpose, the cooling channel was simulated by a stainless steel tube. Heated was the measurement section by electric heaters. The heat transfer from the heaters onto the measuring section was by radiation. Tests were conducted with a Ceramic- and an Inconel-Heater. The power of the heaters was determined by current- and voltage transducers measurement.

The tests were carried out in a vacuum chamber, in order to prevent heat losses to the environment by convection.

Commissioning tests were performed with water and nitrogen. The two substances are harmless and have approximately constant thermo-physical properties in a wide temperature range.

In the measuring section, the temperatures of the fluid, in the inlet and outlet were determined by thermocouples. The mass flow was measured by a coriolis-flow-meter.

From the temperature difference and the mass flow, the heat flux absorbed by the fluid through forced convection could be calculated.

In addition, a fluid-system for nitrous oxide and ethane was built and commissioned. It consists of a filter, a control valve and a dome pressure regulator. This means that mass flow, the ROF and the pressure in the measuring section could be separately adjusted.

IV. Danksagung

Zunächst gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Ing. Esch, meinem betreuenden Professor der Fachhochschule Aachen für die Ermöglichung dieser Arbeit.

Ein besonders herzliches Dankeschön gilt meinem Betreuer Marius Wilhelm, nicht nur für die ausgesprochen gute fachliche Betreuung, sondern auch für die seelische und moralische Unterstützung während der gesamten Arbeit.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den Kollegen am Prüfstand M11 für die außergewöhnlich gute Zusammenarbeit.

Es macht immer viel Spaß mit euch zu arbeiten!

V. Abbildungsverzeichnis

1.1.	Betankung des Planck-Satelliten mit Hydrazin [3]	1
3.1.	Verluste im HM-7 Triebwerk (Ariane 5 ES Oberstufe)[19]	8
3.2.	Vergleich verschiedener Kühlmethoden hinsichtlich abführbarer Wärmestromdichte [20]	9
3.3.	Regenerativkühlung, Dump-Cooling und Filmkühlung im Vulcain Triebwerk [24]	11
3.4.	Bilanz der Wärmestrahlung [27]	13
3.5.	Berechnung des Sichtfaktors für zwei beliebig orientierte diffus strahlende Flächen [28]	14
4.1.	Test mit HyNOx 20 N Triebwerk am Prüfstand M11.5	17
4.2.	Regenerativ gekühlter Thruster mit einem radial verlaufenden Kühlkanal [30]	18
4.3.	Einflussfaktoren auf den Wärmestrom in Triebwerken [30]	19
4.4.	Regenerativ gekühltes Triebwerk mit vier axial verlaufenden Kühlkanälen	20
4.5.	Testaufbau mit erhitzten Kupferblock [34]	22
4.6.	Vakuumkammer am M11.2	23
4.7.	Wärmeübertragung WUMS	24
4.8.	Keramik-Heizer	25
4.9.	Ausschnitt aus technischer Zeichnung des Keramikheizers	26
4.10.	Inconel-Heizer	26
4.11.	Anschluss und Ansteuerung Transformator	27
4.12.	a) Prinzip Sparstelltransformator b) Ersatzschaltbild [35]	28
4.13.	Durch Spannungsspitze zerstörter Keramik Heizer	30
4.14.	Messkette	31
4.15.	Prinzip Strommessumformer [39]	32
4.16.	Aufbau eines Thermoelements [40]	32
4.17.	Ventile und Domdruckminderer	34
4.18.	Funktion des Regelventils MPG 03 PR [42]	36
4.19.	Aufbau der Messstrecke mit dem Thermocoax Heizer	37
4.20.	Messstellenplan Thermoelemente und Drucksensoren	37
5.1.	Versuche mit Wärmebildkamera	40
5.2.	Wärmebildaufnahme eines Keramik-Heizers	40
5.3.	Wärmebildaufnahme Inconel-Heizer	41
5.4.	Charakterisierung eines Keramik-Heizer	44
5.5.	Temperaturverlauf innen und außen an einem Keramikheizer über der Vorgabespannung bei 4 mbar Druck	45
5.6.	Widerstandsverlauf über der Vorgabespannung eines Keramikheizers bei $p=4$ mbar	45
5.7.	Temperaturverläufe der errechneten und der gemessenen Temperatur eines Keramik-Heizers bei $p=4$ mbar	46

5.8.	Leistung drei verschiedener Keramikheizern über der Vorgabespannung bei 4 mbar	47
6.1.	Strahlung zwischen zwei konzentrischen Zylindern endlicher Länge [28]	48
6.2.	Sichtfaktor φ_{12} der Strahlung des Außenzylinders auf den Innenzylinder in Abhängigkeit von X und Y [28]	49
8.1.	Bezeichnung Thermoelemente WUMS	57
8.2.	Schaltplan	58
8.3.	Fluidplan	59
8.4.	Fluidplan mit Wasser	60
8.5.	Technische Zeichnung des Keramikheizer der Firma Rauschert (Herstellerangabe)	61
8.6.	Technische Zeichnung des Inconel-Heizers der Firma Thermocoax (Herstellerangabe)	62

VI. Tabellenverzeichnis

1.1. Vergleich Hydrazin mit verschiedenen Grünen Treibstoffen bei $\epsilon = 40$, $p_{pk} = 10 \text{ bar}$, ρ bei 20°C und 1013 hPa [7]	2
1.2. Zusammensetzung von LMP-103S	4
1.3. Dampfdruck von Lachgas und Ethan bei 20°C und 1013 mbar	4
2.1. Versuchsergebnisse mit Stickstoff	5
2.2. Versuch mit Inconel-Heizer und Wasser	5
2.3. Tests with nitrogen and the inconel- and ceramic-heater	6
2.4. Test with the Inconel-heater and water	6
4.1. Versuche mit regenerativ gekühltem 20 N Triebwerk bei $p_{BK}=3\ldots3.5 \text{ bar}$ [30]	17
4.2. Vergleich Thruster und WUMS	21
4.3. Vergleich Keramik- und Inconel-Heizer	25
4.4. Übersicht über verbaute Sicherungen	29
4.5. Berechnung Leitungsquerschnitt (nach [38])	29
4.6. Bezeichnungen der Thermoelemente	38
5.1. Temperaturen während Versuch 1 (Inconel-Heizer und Wasser); $\dot{m} = 0,3 \frac{\text{g}}{\text{s}}$; $p=4,3 \text{ bar}$	42
5.2. Leistung und Wärmestrom bei Versuch 1 (Inconel-Heizer und Wasser); $\dot{m} = 0,3 \frac{\text{g}}{\text{s}}$; $p=4,3 \text{ bar}$, $c_p = 4,23 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	42
5.3. Temperaturen während Versuch 2 (Inconel-Heizer und Stickstoff); $\dot{m} = 1,3 \frac{\text{g}}{\text{s}}$; $p=5 \text{ bar}$	43
5.4. Leistung und Wärmestrom Versuch 2 (Inconel-Heizer und Stickstoff) $\dot{m} = 1,3 \frac{\text{g}}{\text{s}}$; $p=5 \text{ bar}$, $c_p = 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	43
5.5. Versuchsdaten Versuch 3, $c_p = 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	43
6.1. Stoffwerte von Stickstoff für mittlere Bedingungen in der Messstrecke bei Versuch 3; $6,5 \text{ bar}$ und 99°C	50
6.2. Versuchsauswertung Versuch 3	51
6.3. Stoffwerte von Stickstoff für mittlere Bedingungen in der Messstrecke von Versuch 2; $4,3 \text{ bar}$ und $73,5^\circ\text{C}$	52
6.4. Versuchsauswertung Versuch 2	53
6.5. Stoffwerte von Wasser für mittlere Bedingungen in der Messstrecke in Versuch 1; $4,3 \text{ bar}$ und 84°C	53
6.6. Stoffeigenschaften von Wasser am Siedepunkt bei 146°C und 5 bar	53
6.7. Versuchsauswertung Versuch 1	54

VII. Abkürzungsverzeichnis

ADN	Ammoniumdinitramid
CFD	Computational Fluid Dynamics
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ECHA	European Chemical Agency
FPA	Focal Plane Array
HTP	High Test Peroxide
HyNOx	Hydrocarbons mixed with Nitrous Oxide
MMAN	Monomethylammonium Nitrat
MMH	Monomethylhydrazin
MON	Mixtures of Nitrous Oxide
NOFB	Nitrous Oxide Fuel Blends
PEM	Proton Exchange Membran (Protonen-Austausch-Membran)
RCD	Residual Current Device, Fehlerstrom-Schutzschalter
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
REFPROP	Reference Fluid Properties
ROF	Ratio of Oxidizer to Fuel
SCAPE	Self Contained Atmospheric Protection
SSME	Space Shuttle Main Engine
SVHC	Substances with Very High Concern
TRL	Technology Readiness Level
UDMH	Unsymmetrisches Dimethylhydrazin
WUMS	Wärmeübergangsmessstrecke

VIII. Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

A	$[m^2]$	Fläche
A_a	$[m^2]$	Mantelfläche außen
A_e	$[m^2]$	Düsenaustrittsquerschnitt
A_i	$[m^2]$	Mantelfläche innen
A_R	$[m^2]$	Querschnittsfläche Rohr
c	$[\frac{m}{s}]$	Lichtgeschwindigkeit
c_e	$[\frac{m}{s}]$	charakteristische Geschwindigkeit
c_p	$[\frac{J}{kgK}]$	isobare Wärmekapazität
d	$[m]$	hydraulischer Durchmesser
d_i	$[m]$	Innendurchmesser
d_a	$[m]$	Außendurchmesser
F	$[N]$	Schub
f_2	$[-]$	Einflussfaktor zur Querschnittsberechnung
g_0	$[\frac{m}{s^2}]$	Erdbeschleunigung
h	$[Js]$	Planksches Wirkungsquantum
I	$[A]$	Strom
I_{sp}	$[-]$	spezifischer Impuls
I_B	$[A]$	Bemessungsstrom
I_N	$[A]$	Nennstrom Schutzeinrichtung
I_R	$[A]$	Strombelastbarkeit
k	$[\frac{m^2kg}{s^2K}]$	Boltzmann-Konstante
l	$[m]$	Länge
l_k	$[mm]$	Länge Kühlkanal
l_1	$[mm]$	Länge Rohr
\dot{m}	$[\frac{kg}{s}]$	Massenstrom
Nu	$[-]$	Nusselt-Zahl
P_{el}	$[W; kW]$	elektrische Leistung
Pr	$[-]$	Prandtlzahl
p_a	$[bar]$	Umgebungsdruck
p_{BK}	$[bar]$	Brennkammerdruck
p_e	$[bar]$	Druck am Düsenaustritt
\dot{Q}	$[W; MW]$	Wärmestrom
\dot{q}	$[\frac{W}{m^2}; \frac{MW}{m^2}]$	Wärmestromdichte
\dot{Q}_i	$[W]$	Wärmestrom nach innen
q_N	$[mm^2]$	Nennquerschnitt

\dot{Q}_K	[W]	konvektiver Wärmestrom
\dot{Q}_S	[W]	Wärmestrahlung
\dot{Q}_L	[W]	Wärmeleitung
\dot{Q}_T	[W]	Transmittierte Wärmestrahlung
\dot{Q}_A	[W]	Absorbierte Wärmestrahlung
\dot{Q}_R	[W]	Reflektierte Wärmestrahlung
\dot{Q}_{Kerr}	[W]	errechneter Wärmestrom durch Konvektion
\dot{Q}_{Kal}	[W]	kalorimetrisch gemessener Wärmestrom
\dot{Q}_{LV}	[W]	Verlust durch Wärmeleitung
\dot{Q}_{ax}	[W]	Wärmeleitung radial im Rohr
\dot{Q}_1	[W]	auf eine Fläche eingestrahelter Wärmestrom
\dot{Q}_{12}	[W]	von einer Fläche abgestrahlter Wärmestrom
\dot{q}	$[\frac{W}{m}]$	Wärmestromdichte
Re	[-]	Reynoldszahl
T	[°C]	Temperatur
T_A	[°C]	Fluidtemperatur im Ablauf
T_{Hza}	[°C]	Heizertemperatur außen
T_{Hzi}	[°C]	Heizertemperatur innen
T_{KK}	[°C]	Kühkanalaustrittstemperatur
T_{Max}	[°C]	Maximaltemperatur
T_F	[°C]	Fluidtemperatur
T_{Wa}	[°C]	Temperatur Rohr außen
T_{wm}	[°C]	mittlere Wandtemperatur
T_Z	[°C]	Fluidtemperatur im Zulauf
U	[V]	Spannung
v	$[\frac{m}{s}]$	Geschwindigkeit
v_e	$[\frac{m}{s}]$	effektive Austrittsgeschwindigkeit
x	[m]	Länge

Griechische Zeichen

α	$[\frac{1}{K}]$	Temperaturkoeffizient
α_r	$[-]$	Absorptionsgrad
ϵ	$[-]$	Expansionsverhältnis
ϵ_r	$[-]$	Emissionsgrad
η	$[Pas]$	dynamische Viskosität
λ	$[\frac{W}{mK}]$	Wärmeleitfähigkeit
ν	$[\frac{m^2}{s}]$	kinematische Viskosität
ϕ	$[-]$	Sichtfaktor
ρ	$[\frac{kg}{m^3}]$	Dichte
ρ_r	$[-]$	Reflexionsgrad
σ	$[\frac{W}{m^2K^4}]$	Stefan-Boltzmann-Konstante
τ_r	$[-]$	Transmissionsgrad
ξ	$[-]$	Hilfsfunktion

Inhaltsverzeichnis

I.	Bibliographische Angaben	I
II.	Aufgabenstellung	II
III.	Kurzfassung	IV
IV.	Danksagung	VI
V.	Abbildungsverzeichnis	VII
VI.	Tabellenverzeichnis	IX
VII.	Abkürzungsverzeichnis	X
VIII.	Symbolverzeichnis	XI
	Inhaltsverzeichnis	XIV
1.	Einleitung	1
2.	Zusammenfassung	5
3.	Grundlagen	7
	3.1. Kühlungsmethoden	8
	3.2. Wärmeübertragung	12
4.	Versuchsaufbau	17
	4.1. Auslegung WUMS	19
	4.2. Wärmeübergangsmessstrecken in der Literatur	21
	4.3. Prüfstand	23
	4.4. Heizer	23
	4.4.1. Keramik-Heizer	24
	4.4.2. Inconel-Heizer	25
	4.5. Spannungsversorgung	27
	4.6. Messtechnik	30
	4.6.1. Spannungsmessumformer	30
	4.6.2. Strommessumformer	31
	4.6.3. Temperaturmessung	32
	4.6.4. Druckmessung	33
	4.6.5. Massenstrommessung	33
	4.6.6. Wärmebildkamera	33

4.7. Fluidsystem	34
4.7.1. Domdruckminderer	35
4.7.2. Regelventil	36
4.8. Wärmeübergangsmessstrecke	36
5. Inbetriebnahme und Versuchsdurchführung	39
5.1. Inbetriebnahme Fluidsystem	39
5.2. Versuche mit Wärmebildkamera	39
5.3. Inbetriebnahme WUMS	41
5.3.1. Versuch mit Wasser	41
5.3.2. Versuche mit Stickstoff	42
5.4. Charakterisierung der Heizer	44
6. Versuchsauswertung	48
6.1. Keramik-Heizer	48
6.2. Inconel-Heizer	52
6.2.1. Versuch 2	52
6.2.2. Versuch 1	53
6.3. Diskussion	54
7. Ausblick	56
8. Anhang	57
Literaturverzeichnis	XVI
IX. Selbstständigkeitserklärung	XIX

1. Einleitung

Hydrazin und seine Derivate, unsymmetrisches Dimethylhydrazin (UDMH) und Monomethylhydrazin (MMH), sind seit Jahrzehnten dominante Treibstoffe für Satellitenantriebe.

Seine exzellente Lagerfähigkeit, mit weit über 15 Jahren [1], wurde in der Raumsonde Voyager 1 bewiesen. Voyager 1, gestartet 1977, hat nach mehr als 40 Jahren im All das Sonnensystem verlassen und befindet sich inzwischen im interstellaren Raum. Die letzte Zündung seiner Triebwerke erfolgte 2017 nach 31 Jahren [2].

Der spezifische Impuls von Hydrazin ist mit ca. 220 s als Monergol-Treibstoff relativ hoch. Für die Zündung wird ein flüssiger oder fester Katalysator benötigt, meist findet Iridium Verwendung [1].



Abbildung 1.1.: Betankung des Planck-Satelliten mit Hydrazin [3]

Allerdings ist Hydrazin hochtoxisch und karzinogen [4][5]. Es erfordert eine komplizierte Handhabung zum Schutz von Mensch und Umwelt, zum Beispiel bei der Betankung von Satelliten (Abb.1.1.).

Während des Betankungsvorgangs ist das Tragen sogenannter SCAPE-Suits (**S**elf **C**ontained **A**tmospheric **P**rotection **E**nsemble), Schutzanzüge mit Luft-

versorgung erforderlich. Außerdem muss während der Betankung das Integrationsgebäude geräumt werden.

2011 wurde Hydrazin von der ECHA (**E**uropean **C**hemical **A**gency) auf die REACH-Liste (**R**egistration, **E**valuation, **A**uthorisation, and **R**estriction of **C**hemicals) aufgenommen. Hier zählt es zu den SVHCs (**S**ubstances with **V**ery **H**igh **C**oncern), also Stoffen, die als besonders besorgniserregend gelten. In vielen Bereichen ist Hydrazin in Europa bereits verboten und es kann, trotz Sondergenehmigung, längerfristig auch zu einem Verbot in der europäischen Raumfahrt kommen [5].

Daraus resultiert das Bestreben weniger gefährliche und weniger umweltschädliche Treibstoffe zu entwickeln bzw. einzusetzen. Diese neuen Treibstoffe werden „Grüne Treibstoffe“ (engl. „Green Propellants“) genannt.

Im Folgenden werden einige Kandidaten vorgestellt. In Tab.1.1 sind der spezifische Impuls, die Dichte und der Technologie-Reifegrad (engl. TRL-**T**echnology **R**eadiness **L**evel) zusammengestellt. Der TRL ist ein Beurteilungskriterium, das angibt wie weit entwickelt eine Technologie ist. In der untersten Stufe werden die Grundlagen einer neuen Technologie erforscht. In der höchsten Stufe, TRL 9, wurde das Objekt in einer erfolgreichen Mission erprobt [6].

Tabelle 1.1.: Vergleich Hydrazin mit verschiedenen Grünen Treibstoffen bei $\epsilon = 40$, $p_{pk} = 10 \text{ bar}$, ρ bei 20°C und 1013 hPa [7]

Treibstoff	$I_{sp, \text{Vac}}$ [s]	ρ [kg/m^3]	TRL
Hydrazin	245	1004	am höchsten
H_2O_2	186	1441	hoch
LMP-103S	244-251	1238	hoch
Ionisches Liquid auf ADN-Basis	282	1500	niedrig
Water Propulsion	230-350	997	niedrig
N_2O & C_2H_4	303	879	niedrig

Wasserstoffperoxid H_2O_2

Eine Variante Hydrazin als Satellitentreibstoff abzulösen ist hochkonzentriertes Wasserstoffperoxid als Monergol, mit Konzentrationen höher als 90 %, einzusetzen. Es wird auch HTP (**H**igh **T**est **P**eroxide) genannt.

Vorteile sind gute Zersetzbarkeit durch einen Katalysator, und im Vergleich zu Hydrazin die geringe Toxizität und hohe Dichte. Auch hat man bereits viel Erfahrung mit Wasserstoffperoxid als Treibstoff gesammelt. Er wird bereits als Oxidator für Flüssigkeits- und Hybridtriebwerke eingesetzt. Beispielsweise wurden die Turbopumpen des raketentriebenen Experimentalflugzeugs

X-15 mit Wasserstoffperoxid angetrieben, ebenso wie die Turbopumpen der russischen Soyuz-Rakete [8][9].

Nachteile sind der geringe spezifische Impuls von maximal 186 s und die Inkompatibilität mit vielen in der Raumfahrt üblichen Materialien, wie Titan [10][11].

„Water Propulsion“

Bei „Water-Propulsion“ wird Wasser elektrolytisch in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Zur Elektrolyse muss ein spezielles Verfahren eingesetzt werden, die PEM-Technik. PEMs (**P**roton **E**xchange **M**embrane) sind für Protonen, aber nicht für Wasserstoff und Sauerstoff, durchlässige Membranen die Kathode und Anode voneinander trennen.

Die Zündung erfolgt durch eine Pilot-Flamme mit brennstoffreichem Gemisch, mit Hilfe eines Platin-Katalysators. Die Verbrennung in der Brennkammer ist stöchiometrisch.

Vorteil von Water Propulsion ist der hohe spezifische Impuls ($I_{sp} > 300$ s), allerdings ist das System sehr komplex. Es werden drei Tanks benötigt, jeweils für Wasser, Wasserstoff und Sauerstoff, Elektronik zur Regelung und ein Elektrolyseur [12].

Ionische Liquide (IL)

Als Ionische Liquide werden Salze mit einem Schmelzpunkt unter 100 °C betrachtet.

Ein Beispiel ist das, von der japanischen Raumfahrtagentur (JAXA), entwickelte ionisches Liquid auf ADN-Basis. Die einzelnen Bestandteile 60 % Ammoniumdinitramid (ADN), 30 % Monomethylammonium Nitrat (MMAN) und 10 % Harnstoff (Urea) sind bei Raumtemperatur fest, aber als Mischung flüssig. Das ionische Liquid hat einen spezifischen Impuls von 282 s [13].

LMP-103S

LMP-103S ist ein von der Firma ECAPS patentierter Treibstoff. Es handelt sich um eine Mischung aus ADN als Oxidator, Wasser als Lösungsmittel, Methanol als Brennstoff und Ammoniak als Stabilisator (genaue Zusammensetzung Tab.1.2).

LMP-103S wurde von ECAPS bereits im All demonstriert. Der Satellit Prisma wurde 2010 gestartet und 2015 außer Betrieb gestellt. Hierbei wurde gegenüber Hydrazin eine 8 % höhere Performance festgestellt [14].

Aktuell sind elf Satelliten der Planet SkySat Flotte mit Triebwerken von ECAPS ausgerüstet, acht weitere sind geplant [15].

Tabelle 1.2.: Zusammensetzung von LMP-103S

	H_2O	ADN	Methanol	Ammonia
	[%]	[%]	[%]	[%]
LMP-103S	13,95	63,00	18,40	4,65

Mischungen aus Lachgas und Kohlenwasserstoffen

Eine weitere Alternative, die auch Teil dieser Arbeit ist, sind Mischungen aus Lachgas und Kohlenwasserstoffen. Diese Treibstoffe werden im DLR HyNOx-Treibstoffe (**H**ydrocarbons mixed with **N**itrous **O**xide) genannt. In der Literatur sind Sie auch als NOFBs (**N**itrous **O**xide **F**uel **B**lend) bekannt [4].

Wenn Treibstoff und Oxidator gemeinsam gelagert werden, hat dies den großen Vorteil eines einfachen Systems von monergolen Treibstoffen bei der Performance von diergolen Treibstoffen. Durch die hohen Dampfdrücke, von Lachgas und Ethan, kann auf eine externe Tankbedrückung verzichtet werden.

Tabelle 1.3.: Dampfdruck von Lachgas und Ethan bei 20 °C und 1013 mbar

	Dampfdruck
	[bar]
Lachgas [16]	50,6
Ethan [17]	37,8

Der theoretische spezifische Impuls beträgt 320 s [10][18].

Herausfordernd ist beim vorgemischten Betrieb die Gefahr eines Flammenrückschlags aus der Brennkammer ins Zuleitungs- und Tanksystem. Dies muss durch geeignete Flammensperren, zum Beispiel ein poröses Material, verhindert werden. Die hohe Verbrennungstemperatur von über 3000 K erfordert zudem eine aktive Kühlung von Brennkammer und Düse [10].

2. Zusammenfassung

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Versuchsaufbau sollten Wärmeübergänge in HyNOx-Triebwerken nachgebildet werden. Die Beheizung der Messstrecke erfolgte elektrisch. Untersucht wurden ein Inconel- und ein Keramik-Heizer.

Erste Versuche im Rahmen der Inbetriebnahme wurden mit Wasser und Stickstoff durchgeführt.

Es wurden zwei Versuche durchgeführt, jeweils mit einem Keramik- und einem Inconel-Heizer. Bei diesen Versuchen war die Strömung turbulent. Beim Vergleich zum berechneten konvektiven Wärmestrom wurde deutlich, dass die Reynoldszahl durch die vielen Störungen in der Messstrecke deutlich größer sein musste als die berechnete.

Tabelle 2.1.: Versuchsergebnisse mit Stickstoff

	\dot{m}	p	ΔT	\dot{Q}_{cal}	\dot{Q}_{err}	P_{el}
	$[\frac{g}{s}]$	[bar]	[K]	[W]	[W]	[W]
Keramik	0,99	6,5	146	151	69,1	980
Inconel	1,3	5	97	132	31,2	639

Außerdem wurde ein Versuch mit Wasser und dem Inconel-Heizer durchgeführt. In diesem Versuch war die Strömung laminar. Der errechnete Wärmestrom war deutlich größer, als der aus dem Massenstrom und der Temperatur ermittelte.

Dies lag wahrscheinlich an einem Phasenübergang in der Messstrecke. Der Wärmeübergang wurde, auf Grund der deutlich abweichenden Stoffeigenschaften von Wasserdampf, im Vergleich zu Wasser erheblich verringert. Insbesondere die, um eine Größenordnung kleinere Wärmeleitfähigkeit war ausschlaggebend.

Tabelle 2.2.: Versuch mit Inconel-Heizer und Wasser

	\dot{m}	p	ΔT	\dot{Q}_{cal}	\dot{Q}_{err}
	$[\frac{g}{s}]$	[bar]	[K]	[W]	[W]
Inconel-Heizer	0,3	4,3	120	152,3	212,4

Mit diesen Versuchen, wurde das „Proof-of-Concept“ für diesen Versuchsaufbau erbracht. Für die geforderten Wärmeströme werden allerdings mehrere Heizer benötigt.

Summary

With the experimental setup developed in this thesis, heat transfer in HyNOx-engines were to be reproduced. The heating of the testbed was carried out electrically. An Inconel- and a ceramic-heater were investigated.

The first tests as part of the commissioning, were carried out with water and nitrogen. Two Experiments were carried out with nitrogen. One with a ceramic- and the other with an inconel-Heater. In this tests the flow was turbulent.

A comparison with the calculated convective heat flux showed clearly that the Reynoldsnumber had to be significantly higher, due to the high disturbances in the measuring section, compared to the calculated one.

Tabelle 2.3.: Tests with nitrogen and the inconel- and ceramic-heater

	\dot{m}	p	ΔT	\dot{Q}_{cal}	\dot{Q}_{err}	P_{el}
	$[\frac{g}{s}]$	[bar]	[K]	[W]	[W]	[W]
Ceramic-heater	0,99	6,5	146	151	69,1	980
Inconel-heater	1,3	5	97	132	31,2	639

There was one test carried out with water and the Inconel-heater. In this test, the flow was laminar. The calulated heat flow was significantly higher than the one calculated with the temperature difference, the mass-flow and the heat capacity.

This was due to the phase transition in the measuring section. The heat transfer was notably deteriorated as a result of the different properties of water vapour compared to liquid water. Decisive factor was the multiple times smaller thermal conductivity.

Tabelle 2.4.: Test with the Inconel-heater and water

	\dot{m}	p	ΔT	\dot{Q}_{cal}	\dot{Q}_{err}
	$[\frac{g}{s}]$	[bar]	[K]	[W]	[W]
Inonel-Heater	0,3	4,3	120	152,3	212,4

With this tests the „Proof-of-Concept“ was achieved for this test set-up, but for the required heat fluxes more heaters are needed.

3. Grundlagen

Aufgrund ihres Aggregatzustands lassen sich chemische Triebwerke in vier Klassen einteilen. Triebwerke mit flüssigen, festen oder lithergolen Treibstoffen und Kaltgastriebwerke. Bei den drei Erstgenannten wird der Schub durch die chemische Umsetzung der Treibstoffe erzeugt. Bei Kaltgastriebwerken wird der Schub durch das Expandieren eines, unter sehr hohem Druck gelagerten Gases, ohne Verbrennung durch eine konvergent-divergente Düse erzeugt.

Sind beide Komponenten flüssig, spricht man von Flüssigkeitstriebwerken. Die Treibstoffe können lagerfähig oder kryogen sein. Besteht der Treibstoff aus einer einzigen Komponente, die zum Beispiel durch einen Katalysator zersetzt wird, handelt es sich um einen monergolen Treibstoff (engl. Monopropellant). Hypergole Treibstoffe reagieren bei Kontakt sofort miteinander und machen so ein Zündsystem überflüssig.

In Hybridtriebwerken liegt eine Komponente flüssig, die Andere fest vor. In Feststofftriebwerken sind die Komponenten fest, sie werden bei der Herstellung miteinander vermischt.

Der Schub eines Triebwerks kann mit Hilfe des Impulssatzes berechnet werden.

$$F = \dot{m} \cdot v_e + A(p_e - p_a) \quad (3.1)$$

\dot{m} ist der Massenstrom durch die Düse, v_e die effektive Austrittsgeschwindigkeit, A die Querschnittsfläche am Düsenaustritt, p_e der Druck am Düsenaustritt und p_a der Umgebungsdruck. Im Falle einer angepassten Düse entfällt der hintere Druckterm.

Ein wichtiger Parameter bei der Beurteilung eines Treibstoffs bzw. einer Treibstoffkombination und des gesamten Triebwerks ist der spezifische Impuls:

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m} \cdot g_0} \quad (3.2)$$

In chemischen Triebwerken (z.B. HM-7 Triebwerk in Abb.3.1.) kann nur ein Teil der chemischen Energie des Brennstoffs in Schub umgesetzt werden. Beim HM-7 Triebwerk sind dies etwa 43 %. Verluste sind sowohl thermische und kinematische Strahlverluste, Verluste durch unvollständige Verbrennung und schlechte Mischung als auch direkte Wandverluste. Die abzuführende Wärme beträgt beim HM-7 Triebwerk ca. 2 % der Gesamtleistung. Das regenerativ gekühlte HM-7B Triebwerk bildet die 3. Stufe der Ariane 5 Trägerrakete.

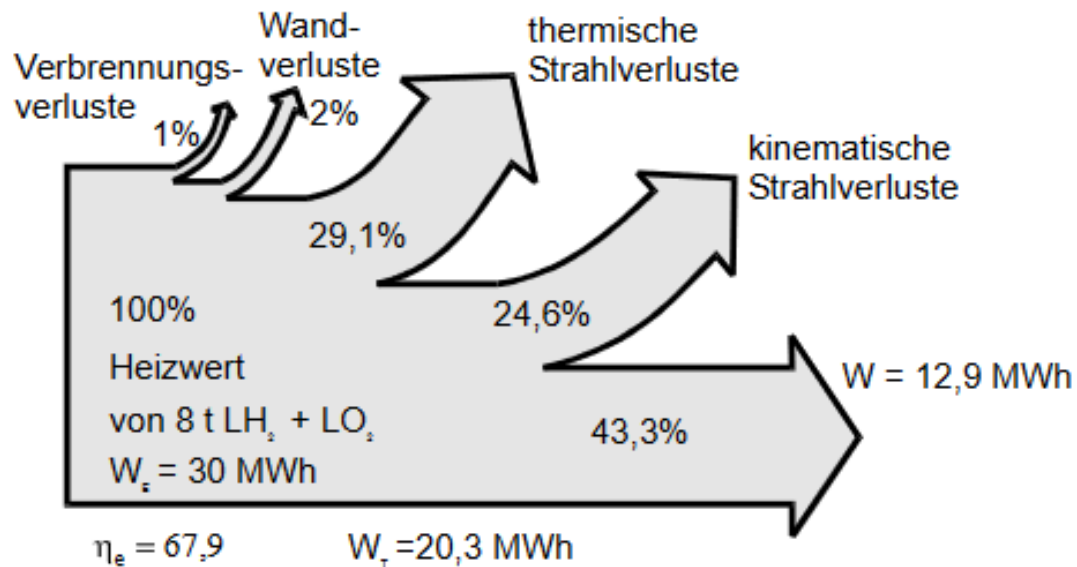


Abbildung 3.1.: Verluste im HM-7 Triebwerk (Ariane 5 ES Oberstufe)[19]

3.1. Kühlungsmethoden

Die Wahl des Kühlungskonzepts hängt im Wesentlichen vom übertragenen Wärmestrom, den Treibstoffen bzw. Treibstoffeigenschaften und der Mission des Triebwerks ab. Weitere Kriterien sind Brennkammerdruck und Treibstofffördersystem.

Es wird unterschieden zwischen aktiven und passiven Kühlverfahren. Bei der Aktivkühlung wird die Wärme durch ein Kühlmedium abgeführt. Zu den Aktiven gehören Filmkühlung, Regenerativkühlung und Transpirationskühlung. Ablativkühlung, Kapazitivkühlung und Strahlungskühlung zählen zu den passiven Kühlungsverfahren (Abb. 3.2.) [19][21].

Ablativkühlung

Ablativkühlung wird eingesetzt, wenn eine Flüssigkeitskühlung nicht möglich oder zu aufwändig ist. Die Brennkammer ist mit einer Schicht aus nicht metallischem, schlecht wärmeleitenden Material beschichtet oder besteht daraus. Dieses Material wird abgetragen und absorbiert einen Teil der thermischen Energie, wodurch die darunter liegende Struktur geschützt wird. Zum Einsatz kommen nicht verkohlende Materialien, zum Beispiel Teflon oder Nylon, die Wärme bei der Aufheizung, Verdampfung und Zersetzung aufnehmen (endotherm). Verkohlende Stoffe, wie Phenol-Nylon bilden bei der Zersetzung eine isolierende Kohlenstoffschicht [22].

Aufgrund der Pyrolyse des Materials ist die Brenndauer begrenzt. Auch ist die dabei auftretende Geometrieänderung zu berücksichtigen. Vor allem die Vergrößerung des engsten Querschnitts spielt eine entscheidende Rolle.

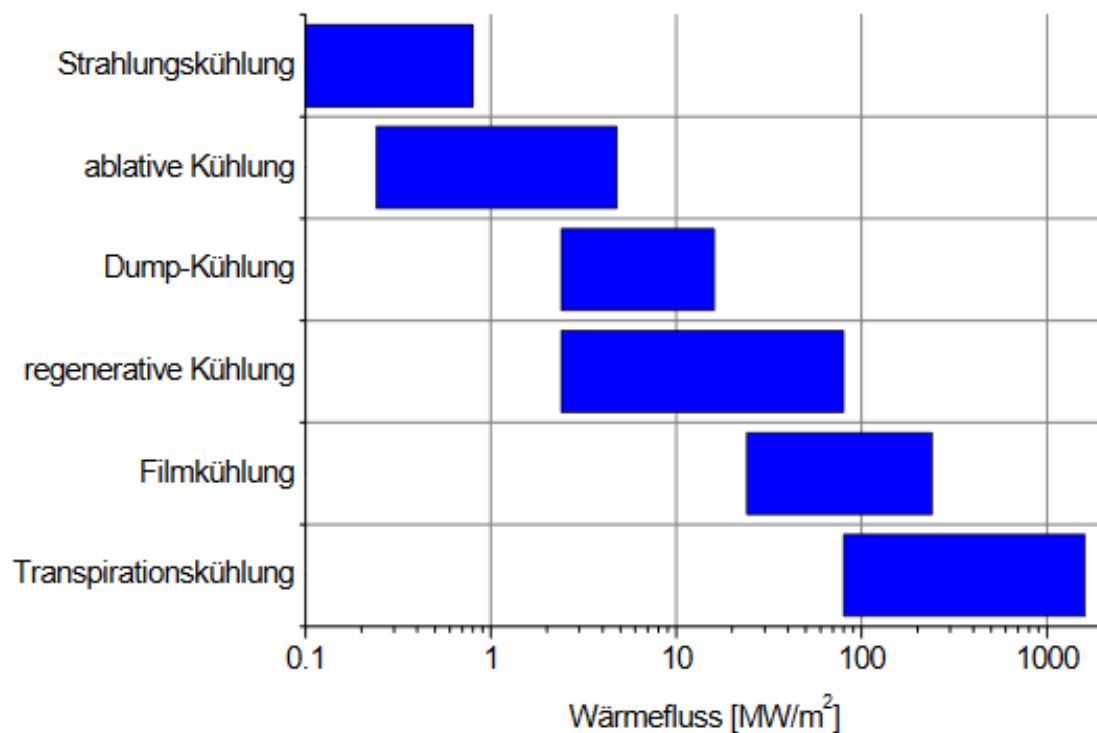


Abbildung 3.2.: Vergleich verschiedener Kühlungsmethoden hinsichtlich abführbarer Wärmestromdichte [20]

Anwendung findet diese Art der Kühlung zum Beispiel bei Feststoffboostern oder bei Triebwerken einfacher Bauart um Kosten zu senken [19].

Kapazitivkühlung

Bei der Kapazitivkühlung wird Wärme über die Brennkammerwand vom Triebwerk selbst aufgenommen. Die Wärme verteilt sich im Material und erhöht dessen Temperatur. Diese Triebwerke sind meist massiv aufgebaut. Des Weiteren sind die Brennzeiten durch die maximal zulässige Materialtemperatur auf wenige Sekunden begrenzt.

Strahlungskühlung

Hier wird Wärme in Form von Wärmestrahlung an die Umgebung abgegeben. Aufgrund begrenzter Wärmebelastung wird eine Strahlungskühlung vorwiegend bei kleinen Triebwerken und für Düsenenerweiterungen eingesetzt, zum Beispiel bei Lageregelungstriebwerken von Satelliten. Düse und Brennkammer glühen je nach Temperatur rot oder weiß [1].

Strahlungsgekühlte Bauteile müssen aus hochtemperaturbeständigen Materialien bestehen, beispielsweise aus Iridium, Rhenium, Niob oder Keramiken.

Filmkühlung

Bei der Filmkühlung wird flüssiger oder gasförmiger Treibstoff, meist der Brennstoff, durch spezielle Bohrungen oder Schlitze, in die Brennkammer bzw. die Düse eingebracht, sodass sich ein schützender Film an der Wand bildet. Durch die Verdampfungsenthalpie kommt es zu einem kühlenden Effekt [21].

Die Wirksamkeit nimmt über die Lauflänge ab. Durch die Vermischung von Verbrennungsgas und Kühlmedium steigt die Temperatur wieder an und es muss erneut Kühlmittel eingebracht werden. Bei diesem Verfahren kommt es zu relativ großen Verlusten, da der zur Kühlung verwendete Treibstoff kaum am Verbrennungsprozess teilnimmt.

Filmkühlung ist vergleichsweise einfach zu realisieren. Daher kommt sie oft bei kleineren Triebwerken oder in Kombination mit anderen Kühlmethoden zum Einsatz. So arbeitet das Vulcain-Triebwerk sowohl mit Regenerativkühlung, Dump-Cooling als auch Filmkühlung (Abb. 3.3.).

Transpirationskühlung

Die Transpirationskühlung ähnelt der Filmkühlung. Das Kühlmedium wird jedoch nicht über Schlitze eingebracht, sondern über eine poröse Wand oder viele einzelne Bohrungen. Da das Kühlmedium nach Durchtritt durch die Wand seinen Aggregatzustand von flüssig zu gasförmig wechselt, wird sie auch Schwitzkühlung genannt.

Das Kühlmittel wird nicht punktuell, sondern flächig zugeführt, somit kommt es zu einer gleichmäßigeren Kühlwirkung als bei der Filmkühlung. Die Transpirationskühlung gilt als effizienteste Kühlmethode. Im Vergleich mit den anderen aktiven Kühlverfahren kann bei gleicher Kühlmittelmenge mehr Wärme abgeführt werden (Abb. 3.2.). Allerdings wird sie in der Raumfahrt bisher selten eingesetzt, da es zu Materialschwierigkeiten kommt [23].

Regenerativkühlung

Bei regenerativ gekühlten Triebwerken befinden sich in der Brennkammer- bzw. Düsenwand Kühlkanäle, durch welche der Treibstoff hindurch zum Injektor geleitet wird. Man unterscheidet Gleich- und Gegenstromverfahren, abhängig von der Fließrichtung des Kühlmediums.

Vorteil ist, dass die Wärme, welche vom Medium aufgenommen wird, nicht verloren geht, sondern dem Verbrennungsprozess wieder zugeführt wird.

Wird das Kühlmedium nicht in der Brennkammer verbrannt, sondern in die Umgebung expandiert, spricht man von Dump-Cooling. Im Gegensatz zur Regenerativkühlung ist dieses Verfahren nicht verlustfrei.

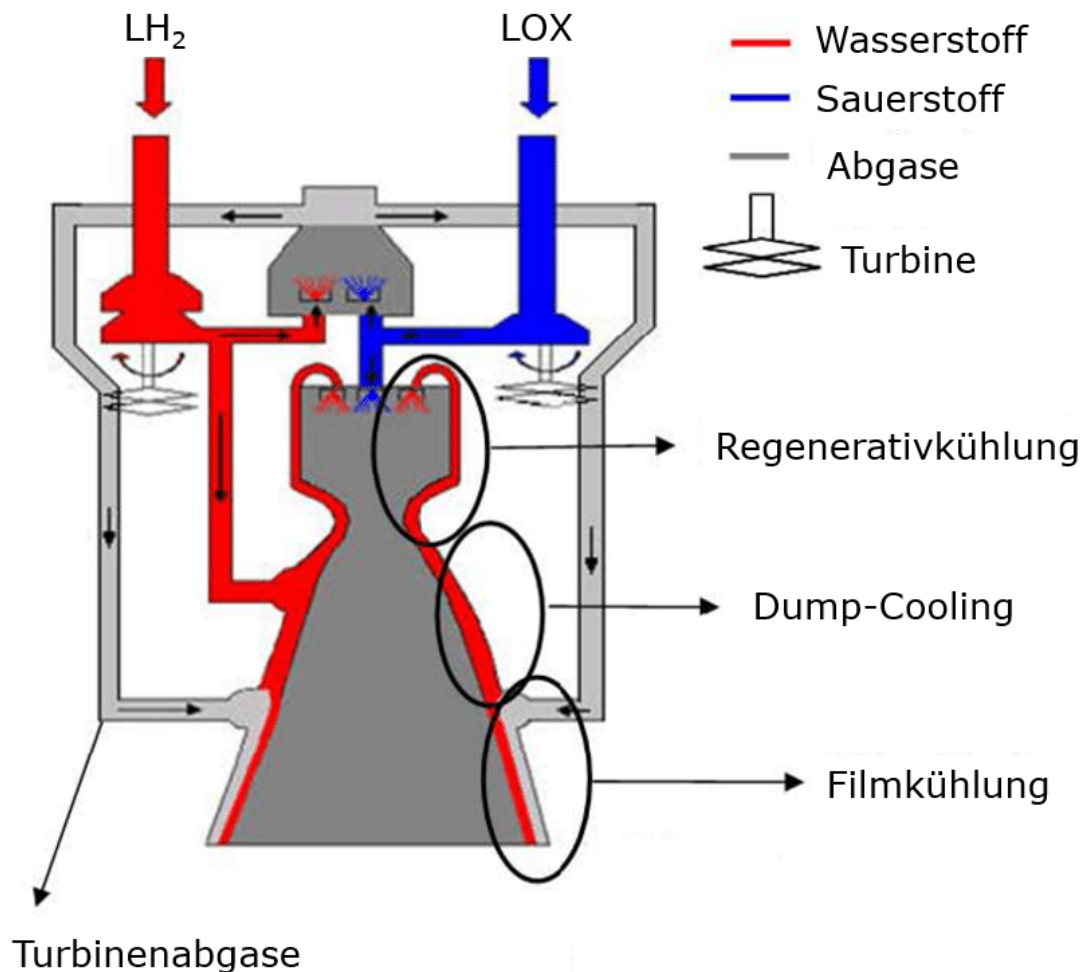


Abbildung 3.3.: Regenerativkühlung, Dump-Cooling und Filmkühlung im Vulcain Triebwerk [24]

Regenerativkühlung und Dump-Cooling finden vorwiegend in Triebwerken mit mittleren bis hohen Schüben Anwendung, da der hohe Druckverlust über die Kühlkanäle ausgeglichen werden muss. Bei kleineren Triebwerken wird nicht nur die Fertigung schwierig, es wird bei Dump-Cooling auch ein prozentual höherer Anteil des Treibstoffs für die Kühlung benötigt.

Als Kühlmedium können sowohl Oxidator als auch Brennstoff verwendet werden. Vorteil bei Verwendung des Brennstoffs ist, dass er im Allgemeinen keine Korrosion im Kühlkanal verursacht. Allerdings kann es bei Kohlenwasserstoffen zu Überhitzung und Zersetzung und dadurch zu Ablagerungen (engl. Sooting) kommen [1][19][25].

Obwohl Regenerativkühlung meist für Triebwerke in den hohen Schubklassen eingesetzt wird, gibt es auch einige Beispiele für kleinere Triebwerke mit Regenerativkühlung.

Der Deutsch-Französische Telekommunikationssatellit SYMPHONIE war mit einem 400 N Apogäumsmotor und sieben 10 N Triebwerken zur Lagekontrolle

ausgestattet. All diese Triebwerke wurden mit MMH und MON (**M**ixed **O**xides of **N**itrogen) betrieben. Die Brennkammer wurde mit einem Brennstofffilm gekühlt, die Düsenenerweiterung mit Strahlungskühlung und der Düsenhals war regenerativ gekühlt [26].

3.2. Wärmeübertragung

Wärme wird immer übertragen, wenn zwischen zwei Körpern oder Systemen ein Temperaturgradient besteht. Im stationären Fall kann die übertragene Wärmemenge nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik berechnet werden (Gl.3.3).

Der Wärmestrom \dot{Q} kann mit der spezifischen isobaren Wärmekapazität c_p , dem Massenstrom \dot{m} und der Temperaturdifferenz ΔT berechnet werden. Ist der Wärmestrom auf eine Fläche bezogen, wird er flächenspezifischer Wärmestrom oder Wärmestromdichte $\dot{q} [\frac{W}{m^2}]$ genannt.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.3)$$

Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik fließt Wärme immer in Richtung der niedrigeren Temperatur. Wärme wird durch Konvektion, Wärmestrahlung und Wärmeleitung übertragen.

Wärmestrahlung

Wenn Wärme in Form von elektromagnetischen Wellen an die Umgebung abgegeben wird, spricht man von Wärmestrahlung. Jeder Körper mit einer Temperatur über 0 K emittiert Wärmestrahlung. Sie ist der einzige Weg, wie in einem perfekten Vakuum Energie übertragen werden kann. Die Wellenlänge der elektromagnetischen Wellen, mit der Wärme übertragen wird liegt zwischen 0,1 μm und 1000 μm .

Wärmestrahlung kann von einem Körper absorbiert, reflektiert oder transmittiert werden.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_A + \dot{Q}_R + \dot{Q}_T \quad (3.4)$$

Die Summe dieser drei Wärmeströme muss immer gleich dem gesamten Wärmestrom sein (Gl.3.4). Teilt man diese Gleichung durch den Gesamtwärmestrom, so erhält man die dimensionslosen Koeffizienten Absorptionsgrad, Emissionsgrad und Reflexionsgrad. Ihre Summe muss immer eins ergeben. Damit es nicht zu Verwechslungen kommt, wird hier der Index r für Wärmestrahlung (engl. radiation) eingeführt.

$$\alpha_r + \rho_r + \tau_r = 1 \quad (3.5)$$

Für viele Stoffe, darunter auch die meisten Metalle ist der Transmissionsgrad gleich null. Es folgt:

$$\alpha_r + \rho_r = 1 \quad (3.6)$$

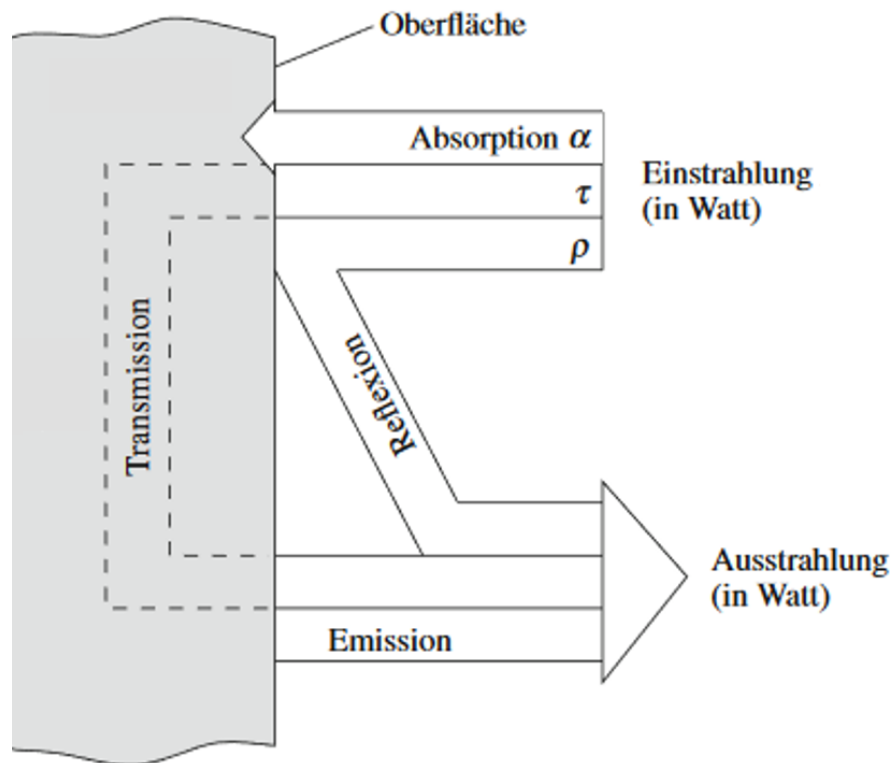


Abbildung 3.4.: Bilanz der Wärmestrahlung [27]

Wichtige Faktoren zur Berechnung der Wärmestrahlung sind die Temperatur des Körpers und der Emissionsgrad ϵ_r . Der Emissionsgrad ist von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig und gibt das Verhältnis an, zwischen der tatsächlichen Strahlungsintensität und der eines schwarzen Körpers. Befindet sich ein Körper im Gleichgewicht, sind emittierte und abgestrahlte Wärmestrahlung gleich groß, woraus folgt $\alpha_r = \epsilon_r$. Ein idealer schwarzer Strahler hat einen Absorptionsgrad von $\alpha_r = 1$, alle auftreffenden Strahlen werden absorbiert. An einem grauen Körper werden alle Strahlen, unabhängig von Wellenlänge zu gleichen Teilen absorbiert. Der Emissionsgrad ist $0 < \epsilon_r < 1$.

Bei realen Körpern ist der Emissionsgrad von Temperatur und Wellenlänge abhängig. Bei farbigen Strahlern wird Strahlung in bestimmten Wellenlängenbereichen bevorzugt reflektiert.

Der Strahlungsanteil kann mit dem Stefan-Boltzmann Gesetz errechnet werden.

$$\dot{Q}_S = \epsilon_r \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A \quad (3.7)$$

σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante, die sich aus der Lichtgeschwindigkeit c , dem Planckschen Wirkungsquantum h und der Boltzmann-Konstante k berechnet.

$$\sigma = \frac{2 \cdot h \cdot c^2 \cdot \pi^4}{15 \cdot \frac{h \cdot c^4}{k}} \quad (3.8)$$

Das Eingehen der Temperatur in der 4. Potenz zeigt die starke Temperaturabhängigkeit der emittierten Strahlung.

Sichtfaktoren

Bei der Berechnung eines Strahlungsenergieaustauschs zwischen zwei oder mehreren Oberflächen unterschiedlicher Temperatur, müssen sogenannte Sichtfaktoren (auch Einstrahlzahlen, Formfaktoren, oder Winkelverhältnis genannt) berücksichtigt werden. Sie erfassen den Einfluss von Lage und Orientierung der Flächen zueinander, also das Ausmaß in welchem eine Fläche von einer anderen gesehen werden kann.

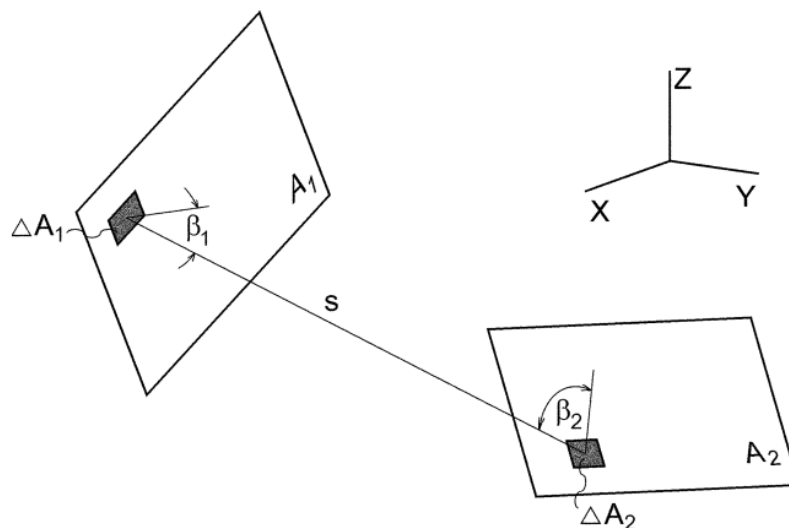


Abbildung 3.5.: Berechnung des Sichtfaktors für zwei beliebig orientierte diffus strahlende Flächen [28]

Sie ist eine rein geometrische Größe und kann bei zwei beliebig im Raum orientierten Flächen durch folgende Gleichung berechnet werden.

$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi A_1} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{s^2} dA_1 dA_2 \quad (3.9)$$

Der Wärmestrom, der auf Fläche 2 trifft, lässt sich wie folgt berechnen:

$$\dot{Q}_1 = \varphi_{12} \cdot \dot{Q}_{12} \quad (3.10)$$

\dot{Q}_{12} ist die Wärmestrahlung die von Fläche 1 ausgesendet wird, \dot{Q}_1 ist die Wärmestrahlung die auf Fläche 2 ankommt [29][28].

Konvektion

Sowohl die freie als auch die erzwungene Konvektion können nur in Flüssigkeiten oder Gasen auftreten, da die Wärmeübertragung durch die Bewegung der Fluide entsteht.

Freie Konvektion

Bei der freien Konvektion entsteht die Bewegung durch Dichteunterschiede eines Mediums bei verschiedenen Temperaturen. An heißeren Stellen ist die Dichte des Fluids geringer, an kälteren Stellen höher. Das heißere Fluid steigt auf, das kühlere sinkt ab.

Erzwungene Konvektion

Erzwungene Konvektion tritt bei einem strömenden Fluid auf, zum Beispiel einer Wasserströmung durch ein Rohr.

Wichtige Faktoren für die Berechnung des konvektiven Wärmestroms sind, neben den geometrischen Größen und den Temperaturen von Fluid und Wand, die Strömungsgeschwindigkeit, die Viskosität, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit des Fluids.

In der Reynoldszahl sind diese Strömungseigenschaften zusammengefasst.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (3.11)$$

Aus der Höhe der Reynoldszahl kann abgelesen werden, um welche Art der Strömung es sich handelt. In Rohren findet der Umschlag von laminarer zu turbulenter Strömung bei $Re = 2300$ statt. d steht für eine charakteristische Länge, bei Rohren ist dies der hydraulische Durchmesser, v ist die Strömungsgeschwindigkeit und ν die kinematische Viskosität.

Die Prandtlzahl verknüpft das Temperaturfeld mit dem Geschwindigkeitsfeld. Sie errechnet sich aus der dynamischen Viskosität η , der isobaren Wärmekapazität c_p und der Wärmeleitfähigkeit λ .

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (3.12)$$

Da die Berechnung des konvektiven Wärmestroms in vielen Fällen auf analytische Weise nicht möglich ist, wurde die dimensionslose Nusselt-Kennzahl eingeführt. Dazu gehören unter anderem turbulente Strömungen oder Strömungen mit Ablösung an einem gebogenen Körper.

Nusselt-Zahlen werden für verschiedene Fälle experimentell ermittelt. Als Beispiel wird die Berechnung einer Nusselt-Zahl nach Glielinski genannt. Gl. 3.14 ist für turbulente Rohrströmungen mit Reynoldszahlen im Bereich $10^4 \leq Re \leq 10^5$, Prandtl-Zahlen im Bereich von $0.1 \leq Pr \leq 1000$ und $\frac{d_i}{l} < 1$.

$$\dot{Q}_k = \frac{Nu_m \cdot \lambda}{l} (T_F - T_W) \cdot A \quad (3.13)$$

$$Nu_m = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d_i}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (3.14)$$

mit

$$\xi = (1,8 \lg Re - 1,5)^{-2} \quad (3.15)$$

In der Raumfahrt werden zum Beispiel auch die Nusselt-Korrelationen von Bartz und Dittus-Boelter angewendet. Weitere Informationen finden sich zum Beispiel in [30].

Wärmeleitung

Bei Wärmeleitung wird die Wärme durch Kontakt zwischen Atomen und Molekülen übertragen. Im Gegensatz zur Konvektion erfolgt die Wärmeübertragung im mikroskopischen Bereich.

Metalle und Legierungen sind im Allgemeinen gute Wärmeleiter. Die Wärmeübertragung erfolgt durch freie Elektronen, die effektivste Art. Die hohe Anzahl freier Elektronen ist der Grund weshalb gute Wärmeleiter fast immer auch gute elektrische Leiter sind.

Bei molekularer Wärmeleitung wird kinetische Energie bei der Kollision von Molekülen ausgetauscht. Heißere Moleküle haben eine höhere kinetische Energie und geben diese bei einer Kollision ab. Da Flüssigkeiten eine höhere Dichte besitzen, leiten sie die Wärme besser als Gase. Allgemein lässt sich feststellen, dass Metalle die besten Wärmeleiter sind und Gase die Schlechtesten.

Die Wärmeleitfähigkeit ist stark von der Temperatur des Mediums abhängig. Während bei Festkörpern und Flüssigkeiten die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Temperatur sinkt, steigt sie bei Gasen an.

Formel 3.16 gibt die Wärmeleitung in einer 1-dimensionalen Platte im stationären Zustand.

$$\dot{Q}_L = \frac{\lambda}{x} \cdot (T_2 - T_1) \cdot A \quad (3.16)$$

λ ist die Wärmeleitfähigkeit, x die Dicke und A die Fläche der Platte.

4. Versuchsaufbau

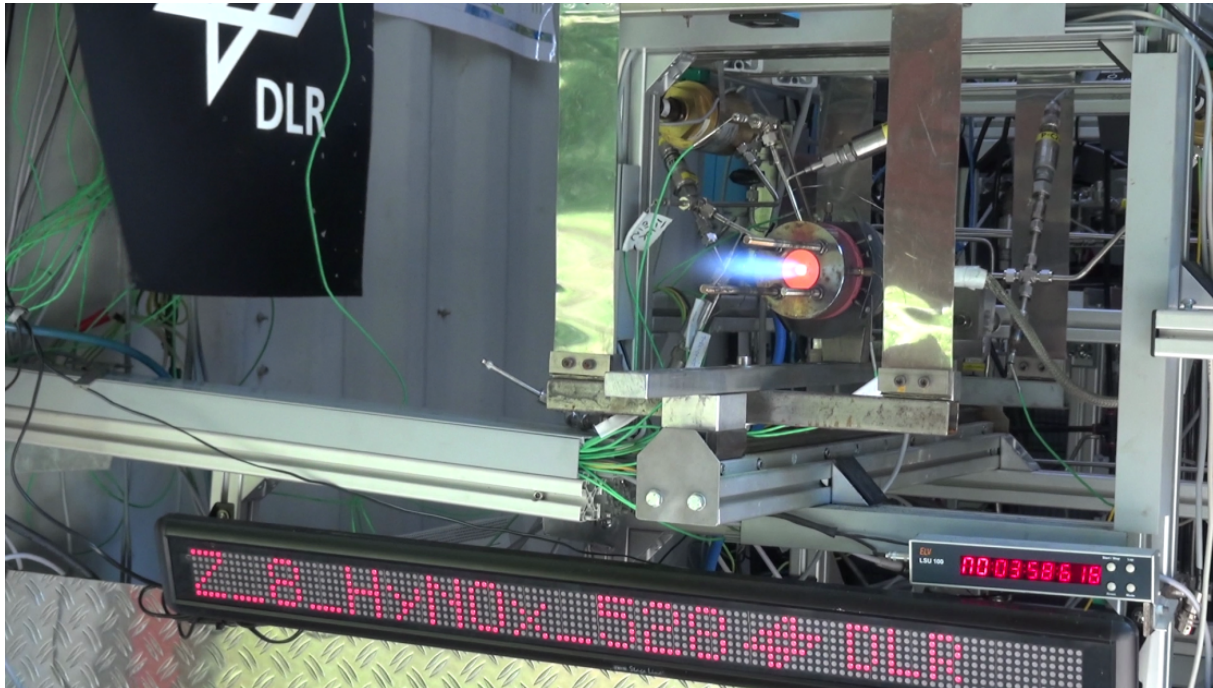


Abbildung 4.1.: Test mit HyNOx 20 N Triebwerk am Prüfstand M11.5

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, müssen Triebwerke mit HyNOx-Treibstoffen, also Lachgas und Kohlenwasserstoffe, wegen der hohen Verbrennungstemperaturen aktiv gekühlt werden.

In einer früheren Arbeit wurde bereits eine Regenerativkühlung an einer Versuchsbrennkammer untersucht. In dem 20-Newton Triebwerk war ein Kühlkanal radial um die Brennkammer angeordnet (Abb.4.2.).

Abb. 4.1. zeigt einen Heißtest mit diesem 20 N Triebwerk am Prüfstand M11.5 im DLR. Als Treibstoff wurden Lachgas und Ethen verwendet. Gekühlt wurde mit gasförmigem Lachgas oder mit verschiedenen Gemischen.

Tabelle 4.1.: Versuche mit regenerativ gekühltem 20 N Triebwerk bei $p_{BK}=3...3.5\text{bar}$ [30]

Versuch	Kühl- medium	\dot{m}_{N_2O}	$\dot{m}_{C_2H_4}$	\dot{m}_{ges}	T_{KKein}	T_{KKaus}	\dot{Q}
		$[\frac{g}{s}]$	$[\frac{g}{s}]$	$[\frac{g}{s}]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[W]$
Z_9_HyNOx_527	Lachgas	6,5	1,5	8	25	293	1591
Z_7_HyNOx_534	Gemisch	7,5	1	8,5	25	325	3000

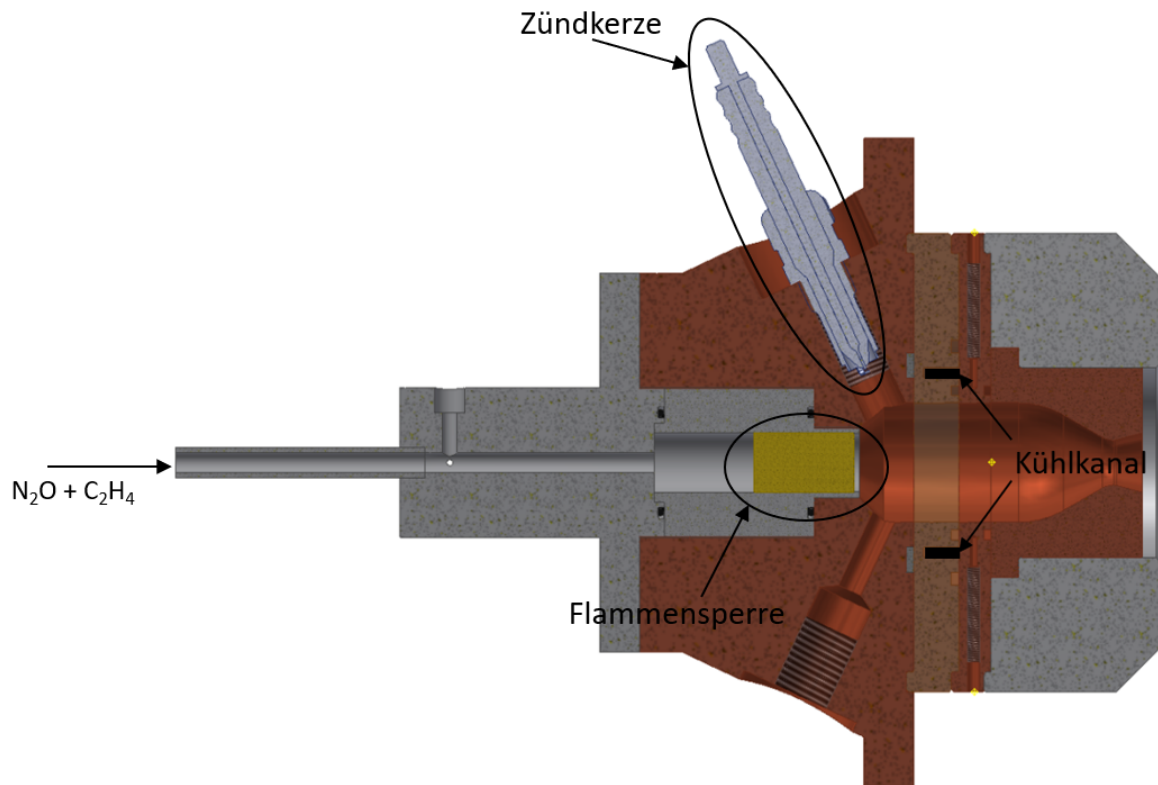


Abbildung 4.2.: Regenerativ gekühlter Thruster mit einem radial verlaufenden Kühlkanal [30]

Aus diesen Versuchen ergaben sich die Randbedingungen für die Wärmeübergangsmessstrecke (WUMS). Tabelle 4.1. zeigt beispielhaft zwei Versuche.

Bei Versuch Z_9_HyNOx_527 wurde die Brennkammer mit Lachgas gekühlt. Der Kühlmittelmassenstrom betrug $\dot{m}_{N_2O} = 6,5 \frac{g}{s}$. Die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur im Kühlkanal betrug $\Delta T_{KK} = 269 K$, daraus folgte ein Wärmestrom von $\dot{Q}_K = 1592 W$.

In einem anderem Versuch (Z_7_HyNOx_534) erfolgte die Kühlung mit einem Gemisch aus Lachgas und Ethan bei einem ROF= 6. Mit einem Gesamtmassenstrom von $\dot{m}_{ges} = 8,5 \frac{g}{s}$, betrug der aufgenommene Wärmestrom $\dot{Q}_K = 3000 W$. Die Kühlkanalausrittsstemperatur war $T_{KKaus} = 326 ^\circ C$.

In Triebwerken hängen viele Faktoren voneinander ab. Die Wärmestromdichte auf die Brennkammerwand ist von Brennkammergeometrie, Brennkammerdruck, ROF und den Strömungsverhältnissen in der Brennkammer abhängig (Abb. 4.3.) [30].

Im Folgenden werden einige dieser Abhängigkeiten näher erläutert.

Lachgas und Ethan verbrennen bei einem ROF=9,41 stöchiometrisch, in diesem Bereich liegen auch die höchste Verbrennungstemperatur und die höchsten Wärmeströme. Die spezifische Wärmekapazität ist ebenfalls vom

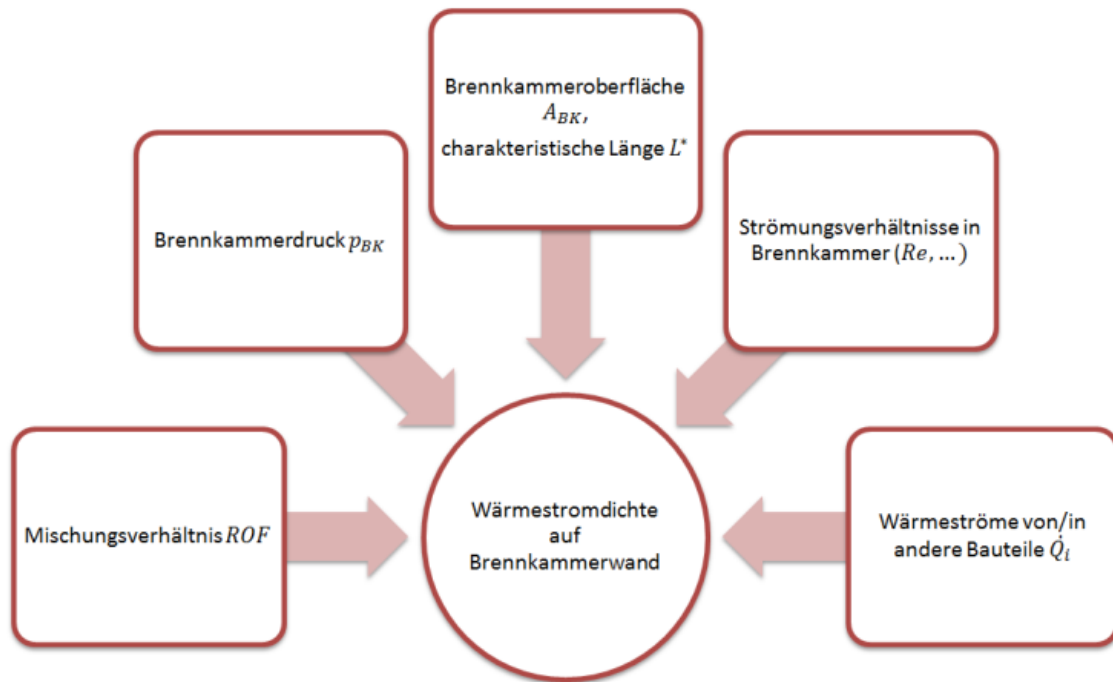


Abbildung 4.3.: Einflussfaktoren auf den Wärmestrom in Triebwerken [30]

ROF abhängig. Sie sinkt mit steigendem ROF, da Ethan ein höheres c_p als Lachgas besitzt. Dadurch sinkt der, vom Kühlmedium aufgenommene Wärmestrom.

Generell steigt die Kühlungswirkung mit steigendem Gesamtmassenstrom und Brennkammerdruck.

Mit WUMS soll nun ein Testaufbau realisiert werden mit dem die Wärmeströme entkoppelt untersucht werden können. Es soll beispielsweise bei einem bestimmten ROF ein bestimmter Wärmestrom erreicht werden. Die Massenströme von Lachgas und Ethan können über Regelventile geregelt werden. Die Wärmeströme werden von elektrischen Heizern erzeugt, die über die Höhe der Spannung geregelt werden.

4.1. Auslegung WUMS

Die Messstrecke wurde so ausgelegt, dass Wärmeströme verschiedener HyNOx-Triebwerke nachgebildet werden.

In Abb. 4.4. ist ein regenerativ gekühltes Triebwerk mit vier axial verlaufenden Kühlkanäle zu sehen. Es wird demnächst am Prüfstand getestet. Versuche sollen mit verschiedenen Massenströmen durchgeführt werden, die kleinsten ca. $5 \frac{g}{s}$. Da sich der Massenstrom in die vier Kühlkanäle aufteilt, und mit WUMS ein Kühlkanal nachgebildet wird, ergibt sich für WUMS ein minimaler Massenstrom von ca. $1 \frac{g}{s}$.

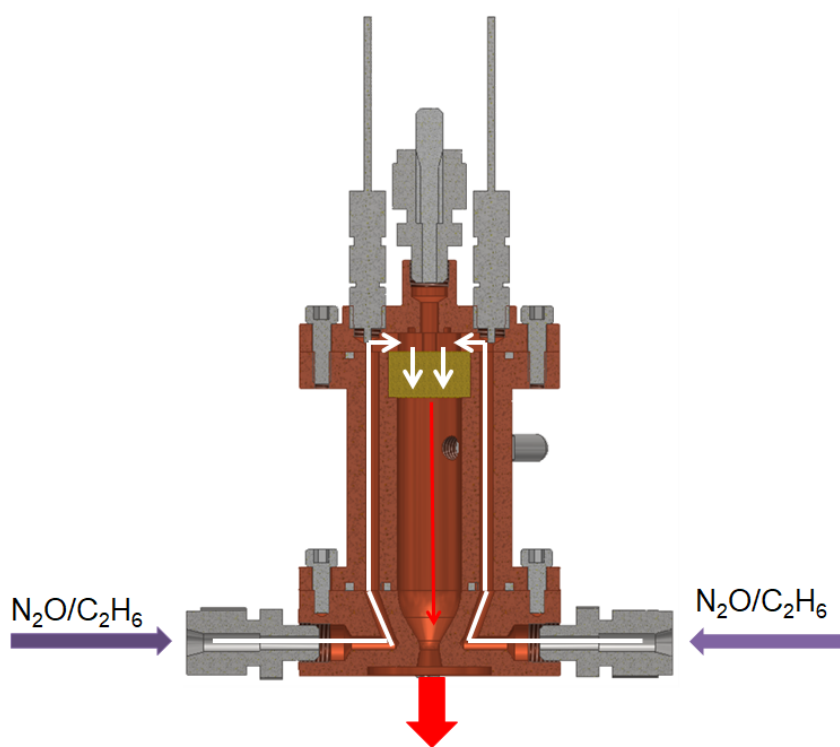


Abbildung 4.4.: Regenerativ gekühltes Triebwerk mit vier axial verlaufenden Kühlkanälen

Der maximale Massenstrom richtet sich nach dem geplanten Triebwerk mit 200 N Schub. Er soll ca. $20 \frac{g}{s}$ betragen.

Die Wärmeströme und die „Kühlkanalaustrittstemperatur“ wurde anhand der mit dem 20N-Triebwerk durchgeführten Versuche festgelegt. Die ins Kühlmedium eingebrachte Wärme sollte somit ca. 500 W betragen. Außerdem soll eine Temperaturerhöhung von ca. 350 K erreicht werden.

Die Kühlkanäle wurden durch Rohre verschiedener Durchmesser und Materialien nachgebildet. In ersten Versuchen wurden Edelstahlrohre verwendet. Da die Brennkammern der Versuchstriebwerke aus Kupfer bestehen, sollten später auch Kupfermessstrecken untersucht werden. Auch Keramikmessstrecken sollten möglich sein. Die Länge der Kühlkanäle ist abhängig von Abmaß und Anzahl der verwendeten Heizer.

Nach einer Literaturrecherche (Kap. 4.2.), zu Testaufbauten die für ähnliche Untersuchungen bereits gebaut wurden, fiel die Wahl auf eine elektrische Beheizungslösung der Messstrecke.

Tabelle 4.2.: Vergleich Thruster und WUMS

	20N Thruster	WUMS
Massenstrom \dot{m}	6...8 $\frac{\text{g}}{\text{s}}$	1...20 $\frac{\text{g}}{\text{s}}$
Kühlkanallänge l_K	ca. 200 mm	variabel, abh. von Anzahl Heizer
ins Fluid eingebrachte Wärme \dot{Q}	ca. 2 kW	?
Kühlmitteltemperatur T_{max}	<400 °C	?

4.2. Wärmeübergangsmessstrecken in der Literatur

Bei der Regenerativkühlung von Triebwerken spielen unter anderem die Kühleigenschaften, thermische Stabilität und bei Kohlenwasserstoffen die Verrußung eine große Rolle. Um diese Parameter zu untersuchen, wurden verschiedene Prüfstände, bzw. Testaufbauten entwickelt. Wichtig ist der einfache Zugang zur Messstrecke, für die Instrumentierung (Druck- und Temperaturmessungen), um zuverlässige Daten zu sammeln. Ebenso sind sehr hohe Wärmestromdichten nötig um die Zustände in der Brennkammer zu simulieren.

Im Folgenden sind zwei verschiedene Möglichkeiten aufgeführt.

Elektrisch beheiztes Rohr

Bei dieser Variante wird Spannung an ein Rohr angelegt, welches sich dann über seinen elektrischen Widerstand erwärmt.

Bei Kupfer und Kupferlegierungen ist der Wärmestrom, durch den großen Leistungsbedarf, auf $1,646 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}$ begrenzt. Wie viel Leistung benötigt wird ist bei einem amerikanischen Aufbau zu erkennen, bei dem vier Schweißtransformatoren parallelgeschaltet wurden. Jeder von ihnen lieferte 125...1500 A bei 0...80 V.

Dazu kommt, dass bei den hohen Strömen die Isolation der Thermoelemente schwierig ist. Es kann leicht zu Kontaktverlust mit dem Rohr, oder einem erhöhten thermischen Widerstand kommen. Außerdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass es wegen des hohen Stroms zu einer chemischen Zersetzung des Fluids oder des Materials kommen kann [31][32][33].

Beheizter Kupferblock

Die hohen Wärmeströme können bei Testaufbauten, die über eine Wärmeleitung erwärmt werden, am besten simuliert werden. Die Messstrecke wird

nicht direkt erwärmt, sondern das umgebende Material. Dazu wurde Kupfer verwendet, da es Wärme sehr gut leitet. Beispielhaft wird hier der Aufbau von E.Maas betrachtet. Dieser besteht aus einem großen Kupferblock, in dem ca. 30 cm lange Patronenheizer (engl. Cartridge-Heater) eingebaut sind (Abb.4.5.). Mit dem im Bild dargestellten Aufbau sollen bis zu $163,6 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}$ er-

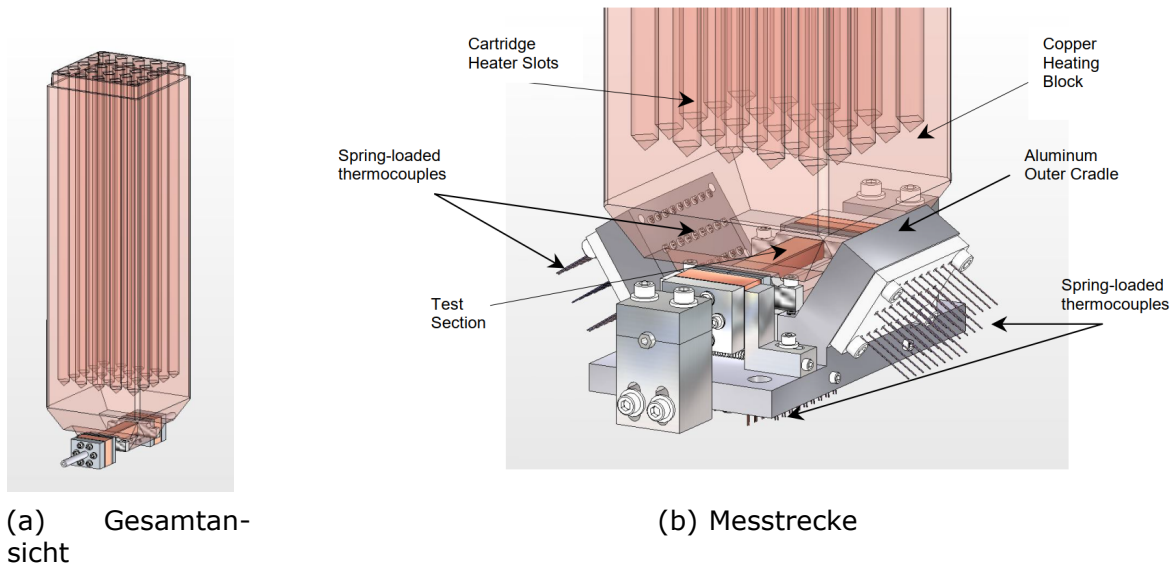


Abbildung 4.5.: Testaufbau mit erhitztem Kupferblock [34]

reicht werden können. Aerojet erreichte mit einem ähnlichen Aufbau $82 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}$ [34].

Um Wärmeverluste durch Konvektion so klein wie möglich zu halten, werden die Versuche im Vakuum durchgeführt.

Für WUMS wurde jedoch mit elektrischen Heizern eine andere Möglichkeit gewählt, da beide Varianten nicht den gestellten Anforderungen entsprachen.

Das elektrisch beheizte Rohr wurde aufgrund der Tatsache nicht ausgewählt, dass verschiedene Materialien der Messtrecke nur schwer zu realisieren sind. Wenn später auch Keramik-Messstrecken untersucht werden sollen, wird dies sogar unmöglich, da Keramiken den elektrischen Strom nicht leiten, weshalb sie oft als Isolatoren eingesetzt werden.

Die zweite Variante, mit dem beheizten Kupferblock, ist aufgrund der massiven Bauweise und der hohen Anzahl benötigter Kartschenheizer teuer. Außerdem mussten im Vorfeld dieses Aufbaus zahlreiche CFD-Simulationen zu Strömungen und Wärmeleitung durchgeführt werden [34].

4.3. Prüfstand

Da bei den Versuchen Wärmeverluste durch freie Konvektion vermieden werden sollten, wurden die Versuche am Höhenprüfstand M11.2. durchgeführt. Hauptkomponenten sind: eine Vakuumkammer, zwei Vakuumpumpen, eine zweistufige Ejektoranlage und ein Echtzeit-Messsystem.

Die Vakuumkammer hat ein Volumen von $4,2\text{ m}^3$ und kann mit den Vakuumpumpen bis zu einem Druck von $<1\text{ mbar}$ evakuiert werden (Abb.4.6.). Die Vakuumpumpen werden meist zur Vorevakuierung oder bei kleinen Triebwerken verwendet.

Die Gasinfrastruktur umfasst H_2 , N_2 , O_2 , und Druckluft bis zu 200 bar.

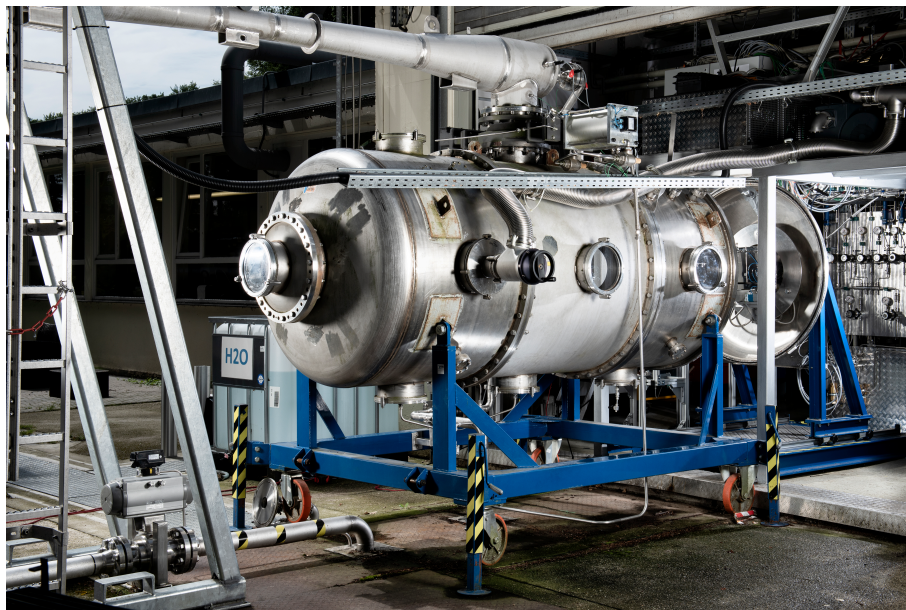


Abbildung 4.6.: Vakuumkammer am M11.2

4.4. Heizer

Für diesen Testaufbau wurden elektrische Heizer verwendet. Hier war jedoch die Schwierigkeit, Heizer zu finden, die die Randbedingungen erfüllen. Der Durchmesser durften nicht zu groß sein, da bei steigendem Durchmesser der Sichtfaktor sinkt und dadurch weniger Wärme auf die Messstrecke eingestrahlt wird. Ferner musste die Wärmestromdichte \dot{q} möglichst hoch sein.

In den Vorversuchen sollte festgestellt werden, welche Heizer für die Versuche geeignet sind. Dazu wurden zwei verschiedene Heizertypen untersucht.

Anforderungen waren zum einen die hohe Temperatur von über 1000°C . Zum anderen musste die Gesamtleistung des Heizers ca. 1 kW betragen, da bei den Heizern mehr als die Hälfte der Wärme nach außen verloren geht.

Wegen dieser Anforderungen sind beide Heizertypen Sonderanfertigungen.

Bei beiden Heizern wird die Wärme über Wärmestrahlung auf die Messstrecke übertragen, dadurch können Rohre aus verschiedenen Materialien und mit verschiedenen Durchmessern für die Messstrecke verwendet werden. Außerdem spielen dann die verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten verschiedener Materialien keine Rolle.

Beide gewählten Heizertypen haben eine Maximalspannung von 110V und nehmen einen Strom von ca. 10A auf.

Die bei dem Aufbau relevanten Wärmeströme sind in Abb.4.7. dargestellt.

Vom Heizer wird Wärme nach außen und innen in Form von Wärmestrahlung abgegeben. Die radial nach außen abgestrahlte Wärme kann nicht genutzt werden. Vom Rohr kann nur die nach innen abgestrahlte Wärme aufgenommen werden, wobei ein Teil vom Rohr reflektiert wird. Zur Erhöhung des Absorptionsgrads wurde das Rohr schwarz lackiert. Dadurch können diese Verluste, soweit wie möglich, minimiert werden.

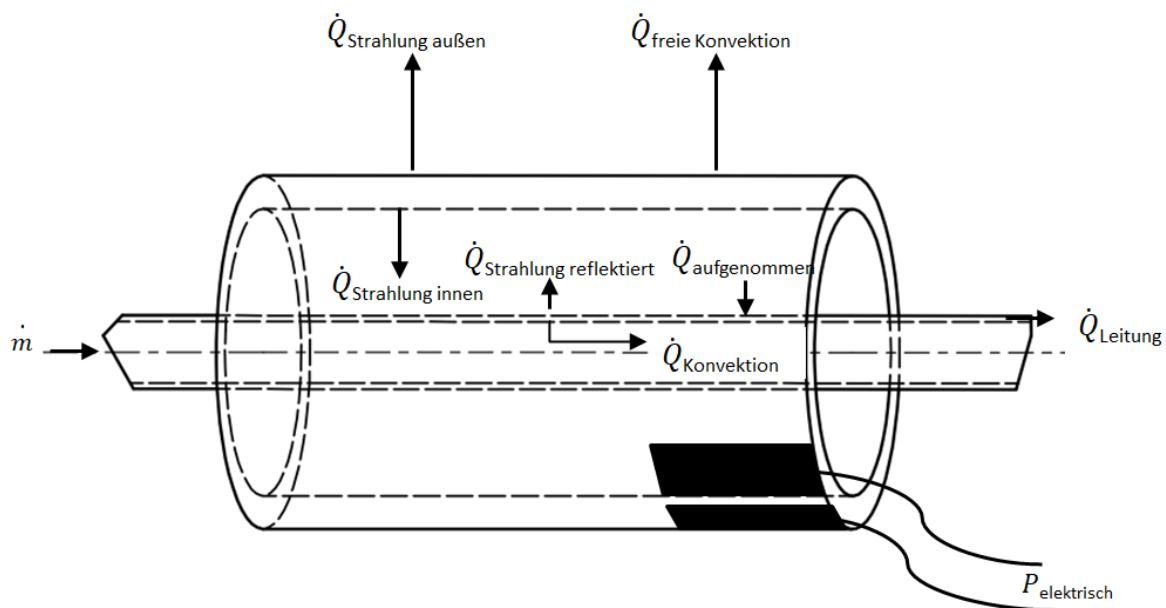


Abbildung 4.7.: Wärmeübertragung WUMS

4.4.1. Keramik-Heizer

Bei den Heizern der Rauschert GmbH handelt es sich um Keramikheizer. Bei den Heizern sind in eine Al_2O_2 -Isolationskeramik Platinleiterbahnen eingesintert (Abb. 4.8.).

Der Heizer erreicht an der Innenseite eine Temperatur von ca. 1100 °C, kurzzeitig ca. 1300 °C, außen ca. 150 K weniger (Kapitel 5.4).

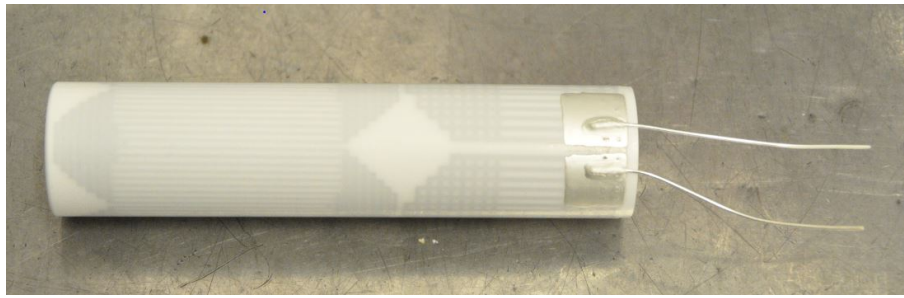


Abbildung 4.8.: Keramik-Heizer

Tabelle 4.3.: Vergleich Keramik- und Inconel-Heizer

	Keramik-Heizer	Inconel-Heizer
elektrische Leistung P	1 kW	1,2 kW
Außendurchmesser d_a	28,8 mm	20 mm
Innendurchmesser d_i	22,86 mm	6 mm
Mantelfläche außen A_a	6429 mm ²	9435 mm ²
Mantelfläche innen A_i	5099 mm ²	2827 mm ²

Die Heizzone ist 70 mm lang, die Heizleistung beträgt auf dieser Strecke ca. 1 kW. Mit Außen- und Innendurchmesser lässt sich die nach innen abgestrahlte, und damit die nutzbare Leistung errechnen (Tab. 4.3). Es werden ca. 380 W nach innen abgestrahlt.

Die vollständige technische Zeichnung des im angepassten Keramik-Heizers befindet sich im Anhang (Abb. 8.5.).

Für diese Anwendung wurde der Heizer so weit wie möglich gekürzt (rot markierte Bereiche in Abb. 4.9). Dadurch entstehen im Betrieb mit mehreren Heizern weniger kalte Bereiche. Folglich ist der Wärmeeintrag homogener und es kann auf kürzerer Strecke mehr Wärme eingebracht werden. Zugleich bleibt die Messstrecke zugänglicher. Der Abstand zwischen Heizbereich und den Anschlüssen konnte nicht verkleinert werden, da es aufgrund der hohen Temperaturen sonst zu Problemen mit den Lötstellen der Anschlüsse gekommen wäre.

4.4.2. Inconel-Heizer

Bei der Firma Thermocoax wurde ein Kontakttheizer angefragt, bei dem ein Heizdraht direkt auf ein 6 mm Rohr aufgelötet ist. Dies wäre allerdings nur mit einem 1 mm Heizleiter möglich gewesen. Die maximale Leistung ist dabei auf 200 W begrenzt. Der Kompromiss um eine höhere Leistung zu erzielen war ein Strahlungsheizer bei dem ein Heizleiter mittels Vakuumlötvorgang auf ein Inconel 600 Rohr aufgelötet ist. Der Heizleiter hat einen Durchmesser

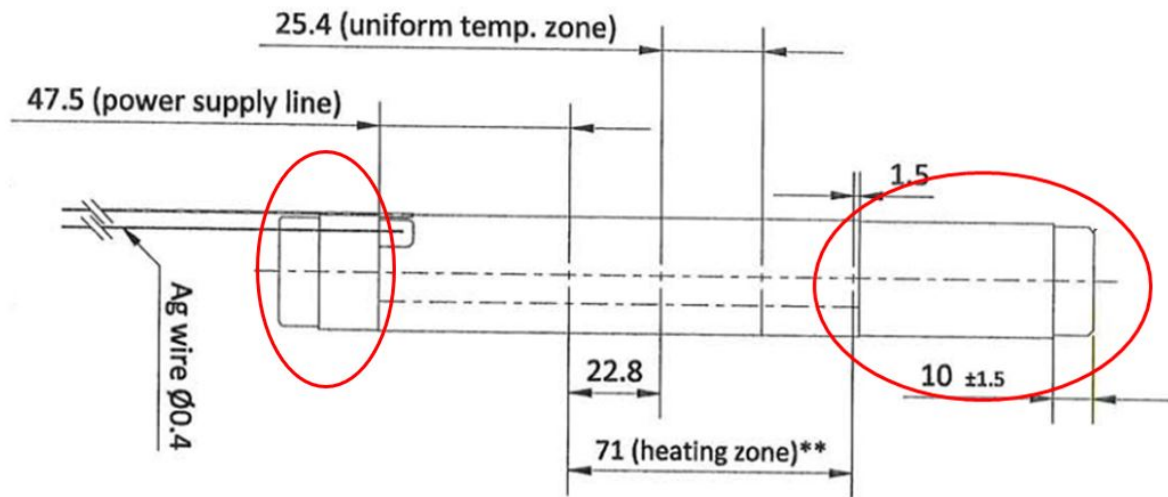


Abbildung 4.9.: Ausschnitt aus technischer Zeichnung des Keramikheizers

von 2,5 mm und eine Länge von insgesamt 320 mm. Der Heizteil ist 220 mm lang. Der Heizer hat eine gesamte Länge von 150 mm und nimmt eine Leistung von 1200 W auf.

Durch den Innendurchmesser von $d_i = 6,1$ mm können Messstrecken mit einem maximalen Durchmesser von 6 mm untersucht werden. Die Maximaltemperatur beträgt 1000 °C.



Abbildung 4.10.: Inconel-Heizer

Eine Schwierigkeit bei diesem Heizer könnte die Wärmeausdehnung von Rohr und Heizer darstellen. Dadurch könnte es zu lokalem Kontakt zwischen Rohr und Heizer kommen, was zu heißeren Stellen führt. Dadurch ist die Wärmeverteilung nicht mehr homogen.

Da hier aber ein großes Volumen an Inconel miterwärmt werden muss, ist dieser Heizer träge. Außerdem strahlt dieser Heizer aufgrund der deutlich größeren Oberfläche außen viel mehr Wärme nach außen als nach innen ab. Im Vergleich zum Keramik-Heizer geht also mehr Wärme verloren (Tab. 4.3).

4.5. Spannungsversorgung

Ein Teil dieser Arbeit bestand darin, die Spannungsversorgung für die elektrischen Heizer zu realisieren.

Beide Heizertypen können bei maximal 110V Wechselspannung betrieben werden. Da sich die Temperatur der Heizer über die Spannung einstellen lässt, sollte die Spannung variabel sein.

Es wurde ein Transformator benötigt, der 230V Netzspannung in eine variable Spannung umwandelt.

Da in zukünftigen Versuchen auch mehrere Heizer parallel angeschlossen werden sollten, erfolgte die Durchführung in den Vakuumtank mit nur einer Phase. Anderenfalls müssten jeweils Strom und Spannung pro Phase gemessen werden. Außerdem kann so sichergestellt werden, dass die Spannung bei allen Heizern gleich groß ist.

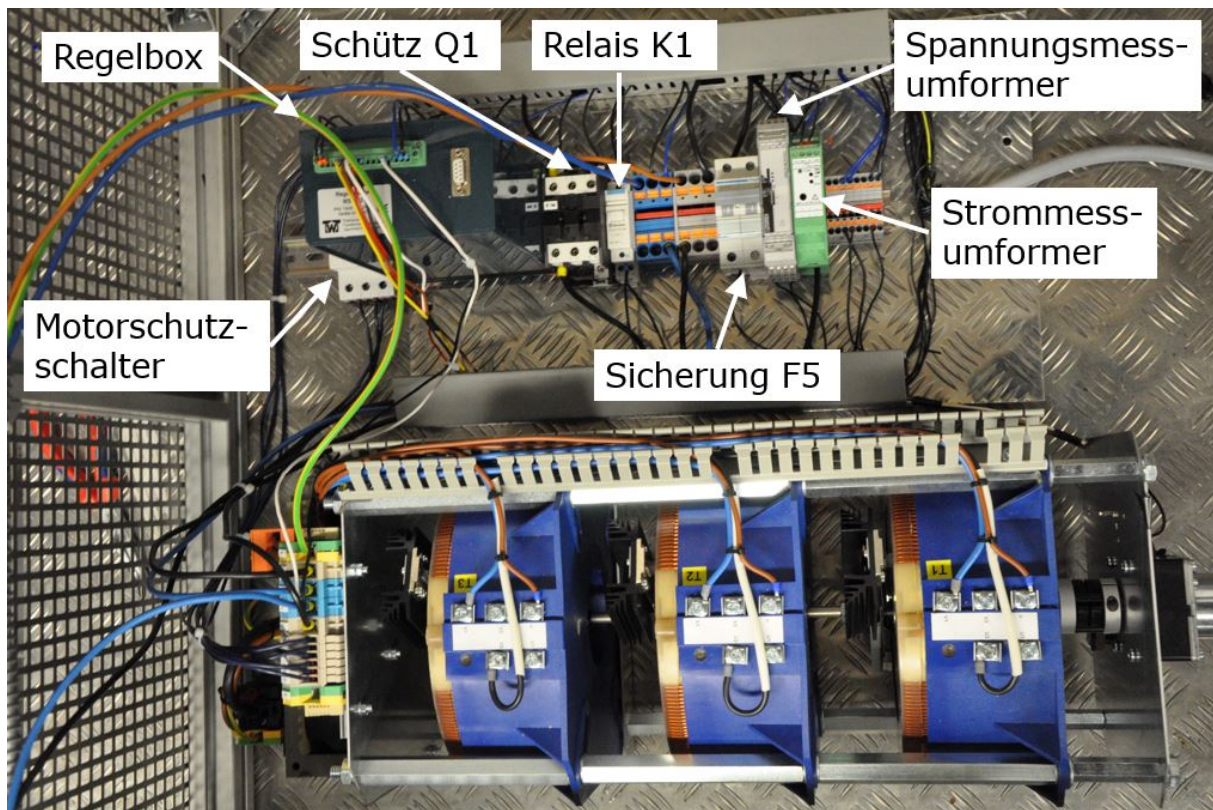


Abbildung 4.11.: Anschluss und Ansteuerung Transformator

Deshalb fiel die Wahl auf den Einphasenstelltransformator der Thalheimer Transformatorenwerke. Um die gewünschte Leistung zu erzielen wurden hier drei Einzeltransformatoren parallelgeschaltet. Die Spannung kann zwischen 0...250V Ausgangsspannung geregelt werden. Es wird durch die Regelbox ein Motor angesteuert, der dann über einen Schleifkontakt die Spannung auf den gewünschten Wert einstellt.

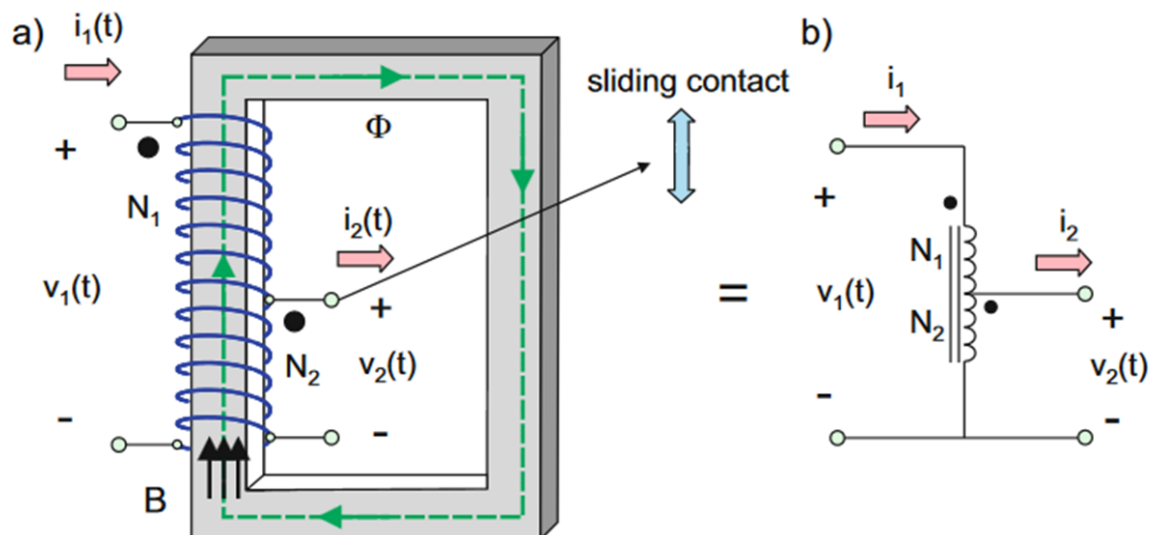


Abbildung 4.12.: a) Prinzip Sparstelltransformator b) Ersatzschaltbild [35]

Laut Datenblatt ist bei einem Eingangsstrom von 80 A bei 230 V, der maximale Ausgangsstrom 72 A bei 250 V.

Als Spartransformator wird ein Transformator bezeichnet, bei der Primär- und Sekundärseite einen Teil der Wicklungen gemeinsam haben. Er wird in den meisten Fällen als Step-Down-Transformator betrieben, also um die Spannung zu reduzieren. Soll die Ausgangsspannung einstellbar sein, wird ein Schleifkontakt verwendet. Bei Spartransformatoren wird sowohl Kerneisen als auch Kupfer für die Wicklungen eingespart [35].

Der Transformator ist im Schaltschrank über eine NEOZED Schmelzsicherung (F1), einen Fehlerstromschutzschalter (F2) und einen Leitungsschutzschalter abgesichert. Leitungsschutzschalter werden auch Sicherungsautomaten genannt und schützen Leitungen und Anlagen gegen Überlastung und Kurzschluss. Ein Bimetall, die thermische Auslösung, erwärmt sich bei Überlast und löst nach einiger Zeit aus. Der elektromagnetische Auslöser löst bei einem Kurzschluss sofort aus, noch bevor der maximale Kurzschlussstrom fließt.

Der Fehlerstromschutzschalter, oder RCD, löst bei einem Differenzstrom zwischen zu- und abfließendem Strom aus.

Die Sekundärseite ist über einen Motorschutzschalter (Q2), eingestellt auf 16 A, abgesichert. Motorschutzschalter schützen, ähnlich wie Leitungsschutzschalter, vor Überlast und Kurzschluss.

Zusätzlich noch gegen das Ausfallen einer Phase, Absinken der Netzspannung oder, bei Motoren, gegen Nichtanlauf [36][37].

Zusätzlich sind zwei weitere Sicherungsautomaten verbaut, die zum einen die Regelbox und die Leitung zum Relais (F4) absichern sollen. Zum anderen den Spannungsmessumformer (F5).

Tabelle 4.4.: Übersicht über verbaute Sicherungen

Bezeichnung	Art	Größe
F1	NEOZED Schmelzsicherung	35 A
F2	RCD	$I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$
F3	Leitungsschutzschalter	C32
Q2	Motorschutzschalter	16 A
F4	Leitungsschutzschalter	C4
F5	Leitungsschutzschalter	D10

Die Verdrahtung des Transformators, die Durchführung in den Tank und der Anschluss der Heizer erfolgte mit Einzeladern. Die Größe des Querschnitts wurde mit Hilfe eines Tabellenbuchs ermittelt und richtet sich nach dem Bemessungsstrom und der Schutzeinrichtung, in diesem Fall die Sicherung F1. Außerdem fließen sogenannte Einflussfaktoren mit in die Berechnung ein, dazu zählen eine von 25 °C abweichende Umgebungstemperatur, gehäufte Leitungsverlegung, vieladrig belastete Leitungen und die Auswirkungen von Oberschwingungen. Daraus ergab sich ein errechneter Querschnitt von 6 mm (Tab. 4.5.) [38].

Tabelle 4.5.: Berechnung Leitungsquerschnitt (nach [38])

Bemessungsquerschnitt	I_B	30 A
Schutzeinrichtung (NEOZED Schmelzsicherung)	I_N	35 A
Einflussfaktoren	f_2	0,85
Strombelastbarkeit	$I_R = \frac{I_N}{f_2}$	41,2 A
Mindestquerschnitt	q_n	6 mm ²

Um zu sicherzustellen, dass zu keinem Zeitpunkt spannungsführende Teile berührt werden können, wurden mehrere Sicherheitsmaßnahmen getroffen. Der Transformator befindet sich mit der gesamten Schaltung in einer geschlossenen Box, bestehend aus Aluminiumprofilen, Aluminiumplatten und Lochblech. Außen am Gehäuse befindet sich ein Hauptschalter, der den gesamten Transformator mitsamt Schutzbeschaltung spannungslos schaltet.

Bei der ersten Inbetriebnahme der Spannungsversorgung wurde deutlich, wie empfindlich die Rauschert Keramik Heizer gegenüber Stromspitzen sind. In Abb.4.13. ist ein zerstörter Heizer zu sehen.

Zu Einschalt-Stromspitzen kann es beim Einschalten eines Transformators kommen, wenn in der Nähe eines Spannungsnulldurchgangs zugeschaltet

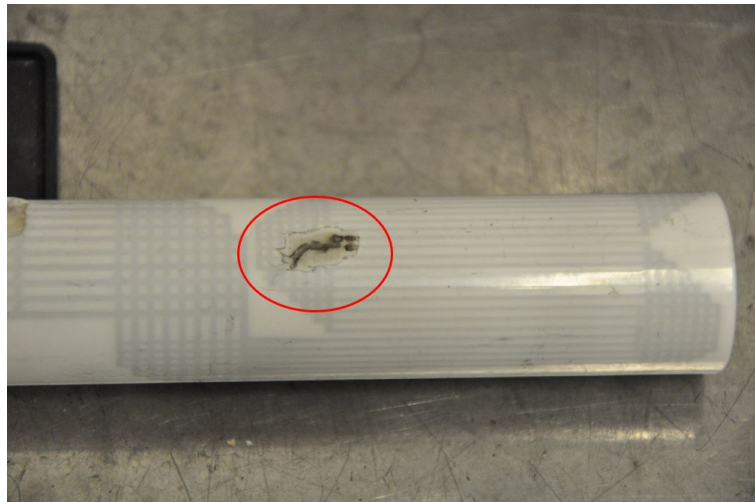


Abbildung 4.13.: Durch Spannungsspitze zerstörter Keramik Heizer

wird. Sie können mehr als das 10-fache des Bemessungsstroms betragen. Im Fall eines Transformators mit getrennter Primär- und Sekundärseite tritt die Stromspitze nur auf der Primärseite auf [37]. Bei einem Spartransformator hingegen kann es zu Stromspitzen im Heizer kommen. Aus diesem Grund wurde Schütz Q3 auf der Sekundärseite eingebaut.

Für das Zuschalten der Sekundärseite sind mehrere Bedingungen zu erfüllen. Zum einen muss der Vakuumtank geschlossen sein, dies wurde über einen Magnetkontakt an der Außenseite des Tanks realisiert. Da der Magnetschalter nicht die Leistung des Transformators schalten kann, steuert dieser ein Relais (K1) an, das wiederum einen Schütz (Q3) ansteuert, der dann über seine Schaltkontakte die Sekundärseite zuschaltet. Außerdem muss über die Prüfstandssoftware ein Transistorausgang geschaltet werden.

4.6. Messtechnik

In Abb. 4.14. ist die Messkette dargestellt. Die Drucksensoren liefern 0 bis 70 mV Signale. Diese werden durch eine Messumformer in 0...10 V Signale umgewandelt. Ebenso wie die Signale des Coriolis-Massenstrommesser, werden der Strom- und Spannungsmessumformer durch ein Analog-Digital-Wandlermodul zum Messwerterfassungssystem ADwin Pro II weitergegeben. Die Signale der Thermoelemente werden mit einer Thermokarte erfasst.

Visuell dargestellt werden die Messdaten mit dem Programm LabView.

4.6.1. Spannungsmessumformer

Mit dem Spannungsmessumformer MACX MCR-VAC wurde die Spannung über den Heizern gemessen. Die Spannungsmessung wurde über eine C4 Sicherung abgesichert.

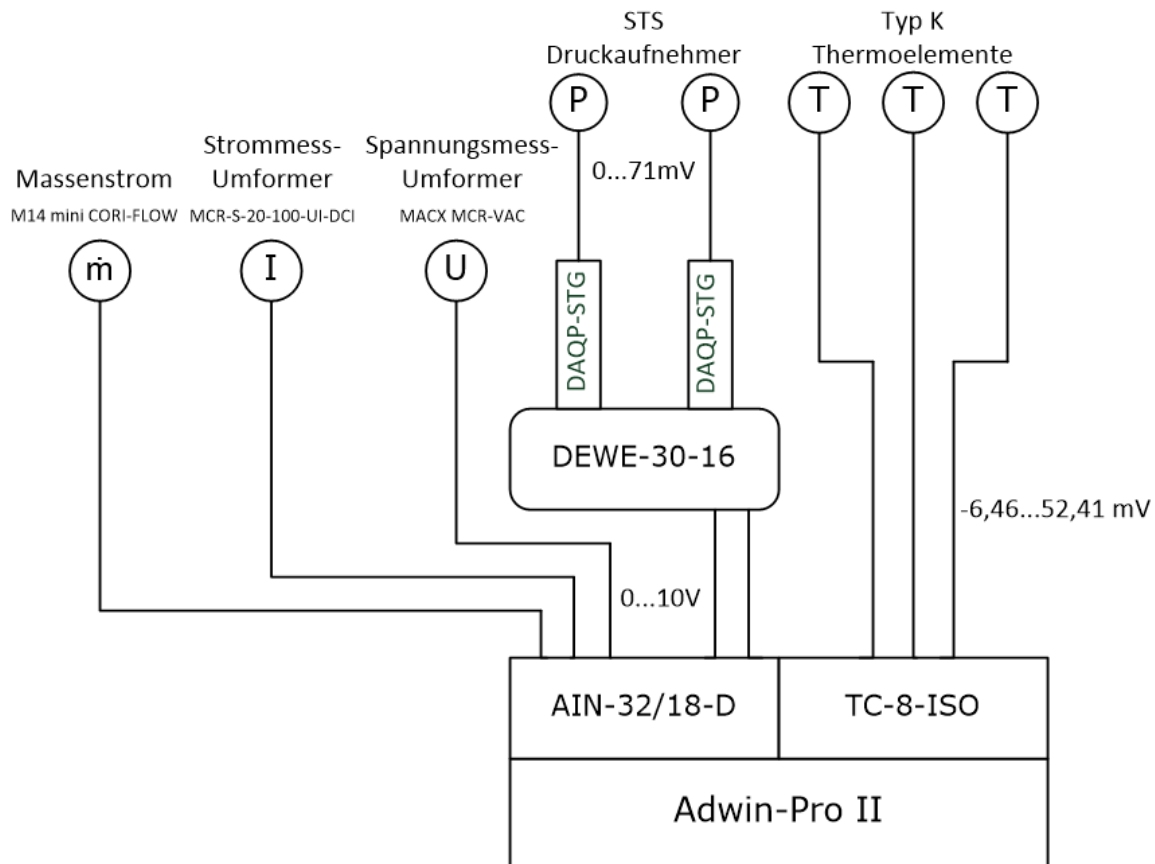


Abbildung 4.14.: Messkette

Die Spannung wurde direkt an den Klemmen im Tank gemessen, um den Spannungsabfall über die Leitungen und Verbindungsstellen (zum Beispiel an der Durchführung in den Tank) nicht mitzumessen.

4.6.2. Strommessumformer

Der Strom den die Heizer aufnehmen wird über einen Strommessumformer MCR-S-20-100-UI-DCI gemessen. Es wird der Effektivwert mittels eines Hall-Sensors erfasst. Durch den Strom wird ein magnetischer Fluss erzeugt, dieser wird dann über einen Hallsensor in eine Hallspannung umgewandelt (Abb. 4.15.)

Der magnetische Fluss und die Hallspannung sind proportional zum fließenden Strom. Abgeglichen wurde der Strommessumformer mit einer Stromzange.

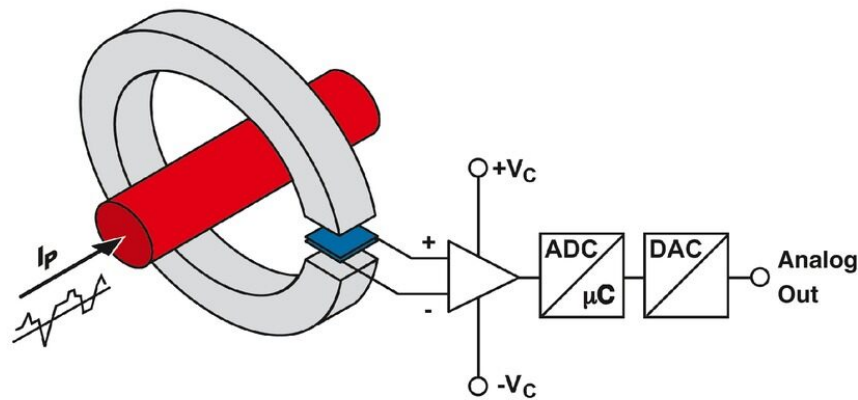


Abbildung 4.15.: Prinzip Strommessumformer [39]

4.6.3. Temperaturmessung

Für die Temperaturmessung wurden Thermoelemente verwendet. In Abb. 4.16. ist der Aufbau von Thermoelementen zu erkennen. Sie bestehen aus zwei verschiedenen elektrischen Leitern, die an einem Ende miteinander verschweißt sind. Aufgrund des Seebeck-Effekts kommt es bei einer Temperaturdifferenz zwischen Messstelle und Vergleichsstelle zu einer Spannungsdifferenz zwischen den Leitern. Aus dieser Spannungsdifferenz lässt sich die Temperaturdifferenz berechnen.

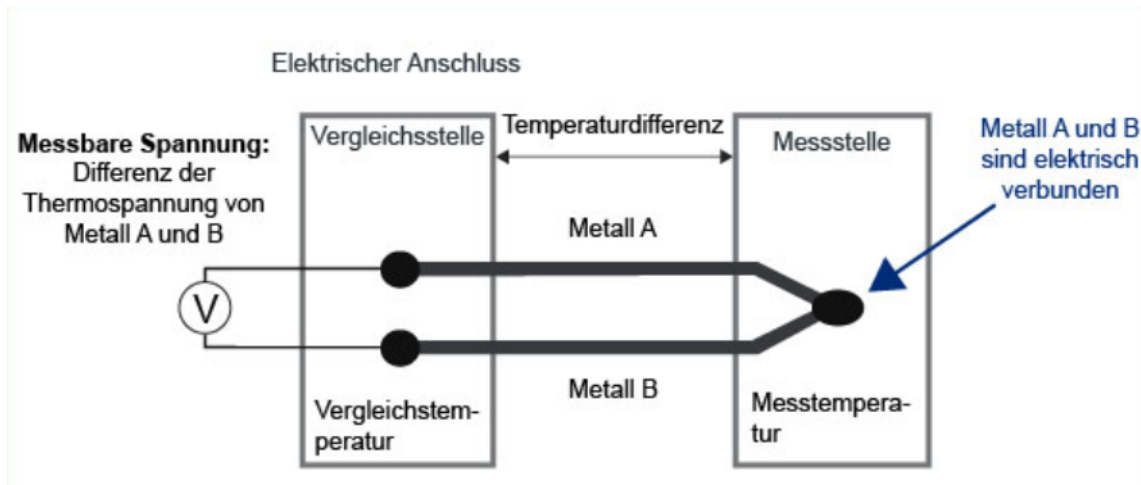


Abbildung 4.16.: Aufbau eines Thermoelements [40]

Für die Temperaturmessung dieser Versuche wurden Thermoelemente des Typs K verwendet. Sie sind aus Nickel-Chrom und Nickel angefertigt. In der Literatur sind gelegentlich Chromel und Alumel als Materialpaarung angegeben, eine andere Angabe der Legierungen.

Der Messbereich von Typ K Thermoelementen reicht von -200°C bis $+1250^{\circ}\text{C}$. Die Maximaltemperatur hängt bei Mantelthermoelementen vom Mantelmaterial ab und kann auch niedriger sein.

Verwendet wurden Klasse 1 Typ K Thermoelemente. In DIN EN 60584 sind die Grenzwerte von -40°C bis 1000°C mit $1,5^{\circ}\text{C}$ oder $0,004 \cdot |t|$ angegeben [41].

4.6.4. Druckmessung

Der Druck wurde mit TM-Absolutdruckaufnehmern, mit einem Messbereich von 0 bis 50 bar von STS gemessen. Es handelt sich um passive Sensoren, deren Messprinzip auf Dehnungsmessstreifen beruht.

Ein Messgitter aus einem elektrischen Leiter ist auf ein Trägermaterial aufgebracht. Durch eine äußere Kraft ändert sich die Länge und dadurch auch der Querschnitt des Leiters. Die resultierende Änderung des Widerstands ist proportional zur Verformung. Diese Änderung wird mit einer Wheatstonschen-Messbrücke ausgewertet, einer Schaltung aus vier Widerständen. Vorteile dieses Messprinzips sind die hohe Genauigkeit, hohe Nenndrücke und die Unabhängigkeit der Temperatur. Der Messfehler ist laut Datenblatt maximal 0,25 % des Skalenendwerts.

4.6.5. Massenstrommessung

Der Massenstrom wurde mit Coriolis Massendruckflussmessern durchgeführt. Das Messprinzip basiert auf dem Coriolis-Effekt. Wenn ein Medium durch ein gebogenes schwingendes Rohr fließt, kommt es zu einer Phasenverschiebung. Diese kann sensorisch erfasst werden und ist proportional zur Durchflussmenge. Der Messfehler ist im Datenblatt bei Gasen mit $\pm 0,5\%$ und bei Flüssigkeiten mit $\pm 0,2\%$ vom Messwert angegeben.

4.6.6. Wärmebildkamera

Für die Versuche wurde außerdem eine Wärmebildkamera benutzt um die Temperaturverteilung der Heizer zu untersuchen.

Zum Einsatz kam die VarioCAM® HD head der Firma INFRATEC.

Die Kamera verfügt über einen ungekühlten Mikrobolometer-FPA-Detektor (engl. uncooled **F**ocal **P**lane **A**rray). Die Wärmestrahlung wird von der Optik des Thermografiesystems auf die Detektorelemente abgebildet und absorbiert. Die daraus resultierende Temperaturänderung kann gemessen werden.

Die Kamera erfasst elektromagnetische Strahlung, im langwelligen infraroten Spektralbereich (LWIR-Longwave Infrared), mit Wellenlängen von $7,5\ldots 14\ \mu\text{m}$.

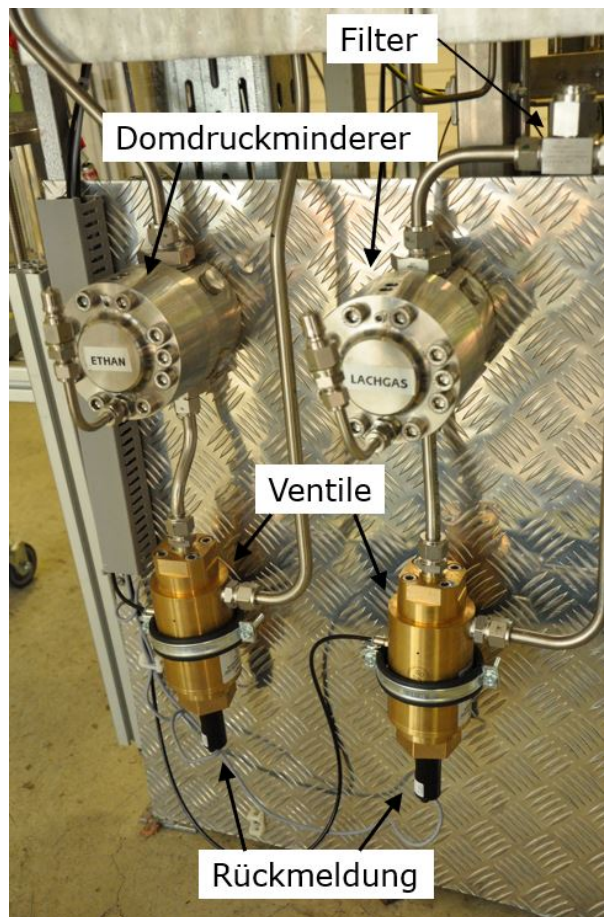


Abbildung 4.17.: Ventile und Domdruckminderer

Der Temperaturbereich reicht bis 2000 °C. Er hat eine Messungenauigkeit von $\pm 1,5$ K oder $\pm 1,5$ %. Die Temperraturauflösung liegt bei 30 °C bei 0,05 K.

4.7. Fluidsystem

Das Fluidsystem ist für Lachgas und Ethan identisch aufgebaut (Abb. 8.3.). Es besteht aus jeweils einem Filter, einem Domdruckminderer, einem Regelventil, einem Coriolis-Durchflussmesser und einem Schussventil direkt vor der Durchführung in den Tank und einer Rückschlagklappe. Vor dem Austritt der Fluide in die Umgebung befindet sich ein Nadelventil.

Die Filter sollen verhindern, dass Verunreinigungen bzw. Fremdkörper in die Domdruckminderer und die Regelventile gelangt. Verwendet wurden FTSS-ML12-7F2 T-Filter von Fitok, sie haben eine Porengröße von 7 μm .

Die Domdruckminderer reduzieren den Druck von 200 bar in den Gasflaschen auf einen Druck zwischen 0...200 bar. Mit den Regelventilen wird der Massenstrom eingestellt. Gemessen wird dieser durch ein Coriolis-Durchflussmesser.

Jeweils ein Magnetventil (Schussventil) befindet sich direkt vor dem Tank. Es kann am Ende eines Versuchs oder im Fehlerfall vom Kontrollraum aus geschlossen werden. Die Rückschlagklappen verhindern Rückströmungen.

Das Nadelventil wurde bei den Versuchen mit Ethan und Lachgas dazu verwendet einen Gegendruck zu erzeugen. Da bei den Versuchen mit Wasser und Stickstoff kein Regelventil verwendet wurde, wurde über das Nadelventil auch der Massenstrom und der Druck in der Messstrecke eingestellt.

Die Ventile (Regelventile und Schussventile) wurden aus dem Kontrollraum über LabView gesteuert. Das Nadelventil wurden von Hand verstellt.

Mit diesem Fluidsystem konnten vom Kontrollraum aus die Massenströme, und damit das ROF, ebenso wie der Druck in der Messstrecke eingestellt werden. Außerdem konnte die Messstrecke vor und nach jedem Versuch mit Stickstoff gespült werden. Damit wird sichergestellt das weder Ethan noch Lachgas in der Messstrecke verbleiben.

Die Stickstoffspülung besteht aus einem Handdruckminderer und einem Schussventil.

Die Verrohrung erfolgte mit Edelstahlrohren von 12 mm Außendurchmesser und 1 mm Wandstärke. Wichtig war, dass geeignete Dichtungen verwendet wurden. Diese mussten zusätzlich mit Lachgas verträglich sein. Wie auch bei den Ventilen war es bei den Verschraubungen wichtig, dass sie öl- und fettfrei waren. Es konnte nur Sauerstofffett verwendet werden, da es bei anderen Schmiermitteln zu Reaktionen mit Lachgas kommen kann.

Die Gasflaschen wurden außerhalb der Testzellen, örtlich getrennt voneinander, aufgestellt um die Sicherheitsanforderungen zu erfüllen.

4.7.1. Domdruckminderer

Um den Druck nach der Gasflasche auf den gewünschten Vordruck zu reduzieren, wurde ein K51 Domdruckminderer der Firma IMI Precision verwendet.

Bei den Domdruckminderern drückt ein Steuergas auf das Diaphragma und öffnet so das Ventil. Als Steuergas kann das zu regelnde Gas genutzt werden, das über einen Steuerdruckregler eingestellt wird, oder über einen externen Steuerdruck. In diesem Versuchsaufbau wird das Steuergas von einem elektropneumatischen Regler vorgegeben.

4.7.2. Regelventil

Zur Regelung des Durchflusses wurde das Proportionalventil MPG 03 PR der Firma m-tech GmbH verwendet. Es handelt sich hier um ein stellungsgeregeltes Ventil, das zwischen 0...100 % geregelt werden kann (Abb.4.18.).

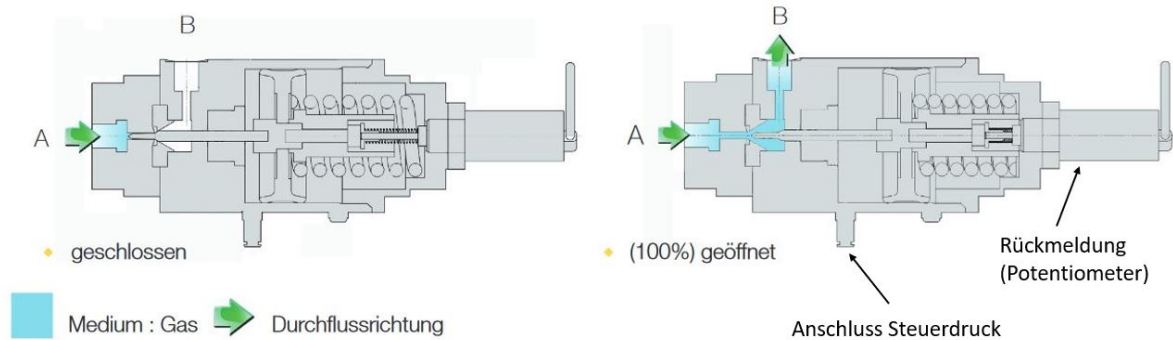


Abbildung 4.18.: Funktion des Regelventils MPG 03 PR [42]

Die Ansteuerung des Ventils erfolgt über einen Steuerdruck zwischen 1,4...7 bar. Der Steuerdruck wird über einen elektropneumatischen Positionier- und Prozessregler, ebenfalls der Firma m-tech, vorgegeben. Angeschlossen wird er über einen Kunststoffschlauch. An diesen Regelkopf muss ein Steuerdruck von 7 bar angelegt werden. Der Regelkopf muss nach jeder Änderung des Steuerdrucks neu kalibriert werden, daher ist dieser über den Versuch möglichst konstant zu halten. Die Ansteuerung erfolgt über ein 0...10 V Analogsignal, ebenso die Rückmeldung, die vom Regelkopf ausgegeben wird. Die Rückmeldung vom Ventil erfolgt über ein Potentiometer (Abb. 4.17.).

4.8. Wärmeübergangsmessstrecke

Der Versuchsaufbau (Abb. 4.19.) besteht aus der Messstrecke selbst, einem geschwärzten Edelstahlrohr mit 3 mm oder 6 mm Außendurchmesser. Die Wandstärke war 0,5 mm bzw. 1 mm. Druck und Temperatur werden jeweils vor und nach dem Heizer an einer Kreuz-Verschraubung gemessen.

Da blanker Edelstahl einen relativ niedrigen Emissionsgrad hat wurde das Rohr mit einem Hochtemperaturlack geschwärzt.

Zur Halterung der Messstrecke wurde ein Breadboard verwendet, auf dem sich ein Raster aus Gewindelöchern befindet, in die Haltestangen eingeschraubt werden können. Das Breadboard ist auf einer Aluminium-Schiene montiert. Die Messstrecke ist mit Stativmuffen gehalten.

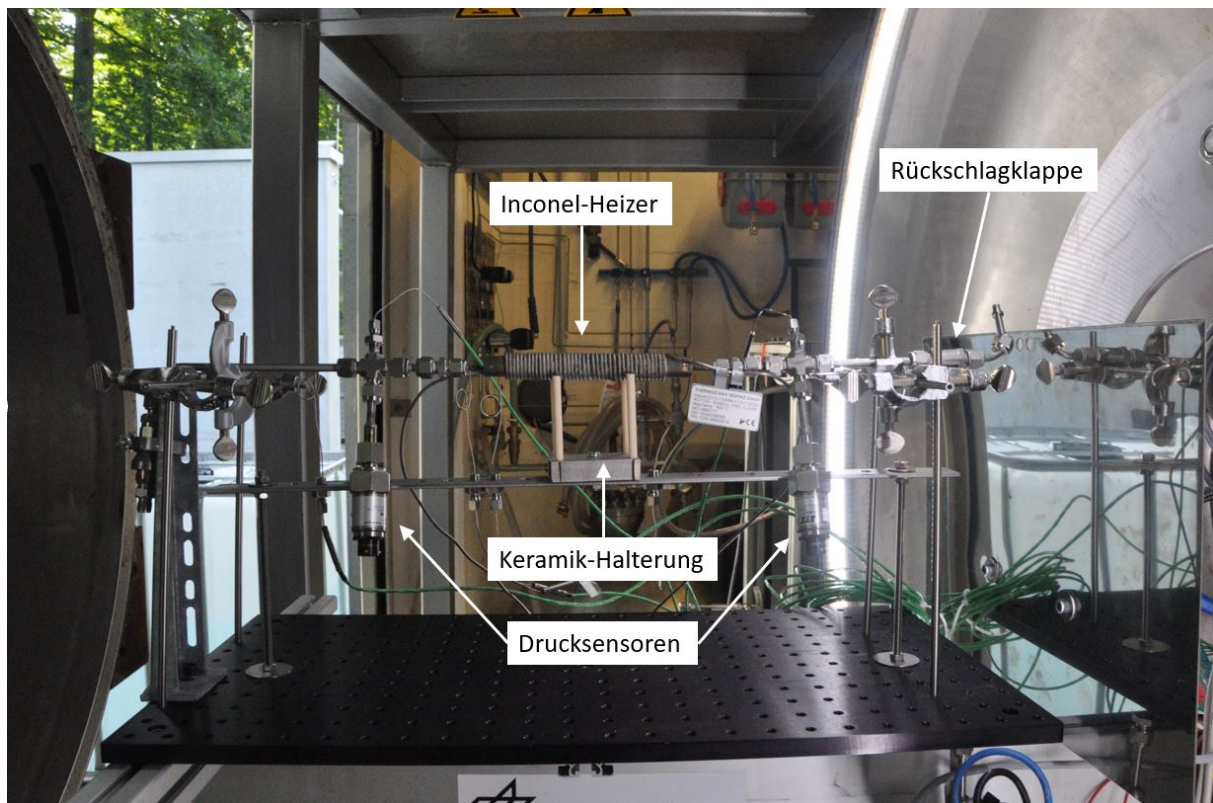


Abbildung 4.19.: Aufbau der Messstrecke mit dem Thermocoax Heizer

Damit sich die Messstrecke in der Länge ausdehnen kann, ist die Halterung wie eine Fest-Loslagerung aufgebaut.

Durch diesen Aufbau war die Messstrecke sehr variabel. Es konnte einfach in der Höhe verstellt werden, um beispielsweise die Messstrecke immer mittig im Heizer zu positionieren. Außerdem konnte der Aufbau relativ einfach demontiert werden. Weiterer Vorteil dieses Aufbaus war, dass schnell auf mehrere Heizer aufgerüstet werden konnte.

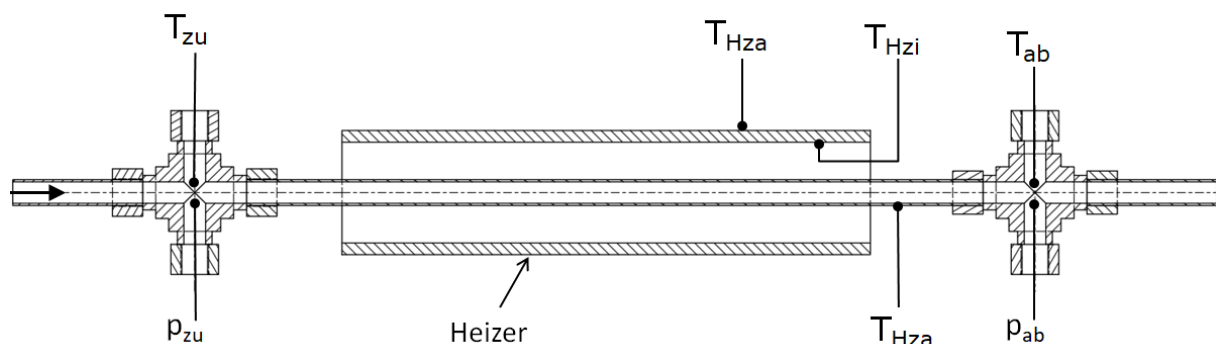


Abbildung 4.20.: Messstellenplan Thermoelemente und Drucksensoren

Wegen der hohen Temperatur der Heizer, mit über 1000 °C, wurde eine Halterung aus Keramik gefertigt. Vorteil bei Keramik ist, dass wegen seiner schlechten Wärmeleitfähigkeit kaum Wärme über die Halterung abfließt. Zir-

konoxid hat eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 2,5 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, im Vergleich dazu ist λ bei Stahl je nach Legierung $46,5 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$. Dies war auch auf den Aufnahmen mit der Thermokamera zu erkennen (Kap. 5.2).

Um die Außentemperatur der Heizer zu messen, wurde eine Schiene gefertigt in die Thermo-Einschrauber eingeschraubt werden um die Thermoelemente zu halten.

Die Temperaturen sind wie folgt bezeichnet:

Tabelle 4.6.: Bezeichnungen der Thermoelemente

T_Z	Fluidtemperatur im Zulauf
T_A	Fluidtemperatur im Ablauf
T_{Hza}	Temperatur des Heizers außen
T_{Hzi}	Temperatur des Heizers innen
T_{Ra}	Temperatur des Rohrs außen

5. Inbetriebnahme und Versuchsdurchführung

5.1. Inbetriebnahme Fluidsystem

Das Fluidsystem für Lachgas und Ethan wurde mit Stickstoff in Betrieb genommen. Dazu wurde an die Anschlüsse, welche für die Gasflaschen vorgesehen wurden, Stickstoff angeschlossen.

An die Domdruckminderer wurde der Steuerdruck, jeweils von einem elektropneumatischen Regler, angeschlossen.

Die Regelventile wurde über einen Steuerdruck geregelt, der von den Regelköpfen zur Verfügung gestellt wird. An die Regler wird ein Versorgungsdruck von ca. 7 bar angelegt. Dieser Druck wurde über einen Handdruckminderer eingestellt. Zur Inbetriebnahme wurden die beiden Regelventile auf diesen Druck kalibriert. Wichtig war, dass diese Kalibrierung vor jedem Versuch, bzw. nach jeder Änderung des Steuerdrucks durchgeführt wird, da sich mit dem Steuerdruck auch der Stellbereich des Ventils ändert. Die Aus- und Eingangssignale wurden an den Regelköpfen auf 0...10 V eingestellt, damit die über den Messrechner angesteuert werden konnten.

Um alle Rohrverschraubungen und Anschlüsse auf Leckagen hin zu überprüfen wurde das gesamte System angedrückt. Beim Abdrücken des Systems wurde das Regelventil geschlossen. Dann wurden alle Verschraubungen auf Dichtheit überprüft.

5.2. Versuche mit Wärmebildkamera

Um die Wärmeverteilung der Heizer genauer zu untersuchen wurden Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera gemacht (Kap.4.6.6). Da die Scheiben im Vakuumtank für Infrarotstrahlung im Bereich der Infrarot-Kamera nicht durchlässig sind wurden diese Versuche unter Umgebungsbedingungen durchgeführt. Es müssten spezielle Scheiben verwendet werden, die in zwischen 7,5 μm und 14 μm transmissiv sind. In Frage kommen zum Beispiel Zinkselenid oder Bariumfluorid [43]. Diese Materialien sind allerdings sehr teuer.

Abb. 5.1. zeigt den Versuchsaufbau mit dem Inconel-Heizer. Die Glasscheiben wurden für die Versuche entfernt. Folglich war der Einfluss, der freien Konvektion bedeutend. Dadurch konnten nur qualitative Aussagen über die Wärmeverteilung gemacht werden. Außerdem war die Bestimmung des Emissionsgrades vor allem beim Thermocoax Heizer schwierig, da dieser stark von der Temperatur anhängig ist.



Abbildung 5.1.: Versuche mit Wärmebildkamera

Keramik-Heizer

Beim Keramik-Heizer Heizer kann man genau die Heizzone erkennen, in der die Wärmeverteilung auch konstant ist (Abb. 5.2.). Auf der Aufnahme der Infrarot-Kamera ist dies gut am Farbverlauf zu erkennen

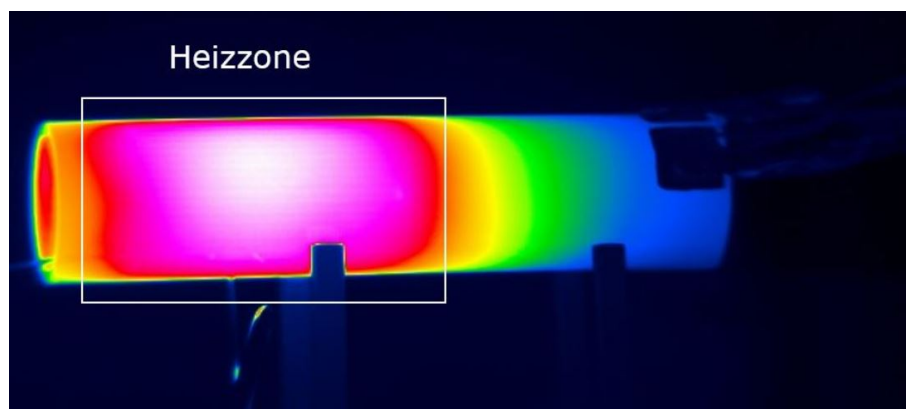


Abbildung 5.2.: Wärmebildaufnahme eines Keramik-Heizers

Auch ist zu erkennen, dass über die Keramikhalterung kaum Wärme abfließt.

Inconel-Heizer

Beim Inconel-Heizer sind die einzelnen Windungen zu erkennen, die Temperaturverteilung ist an der Außenseite nicht homogen (Abb. 5.3.). Durch

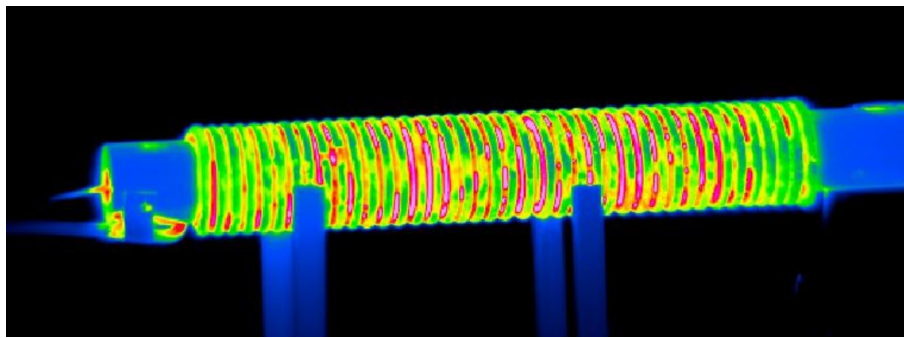


Abbildung 5.3.: Wärmebildaufnahme Inconel-Heizer

die hohe Wandstärke des Inconel-Rohrs wird die Wärmeverteilung allerdings homogenisiert. Anders als Keramik-Heizer kann keine Außentemperatur des Heizers gemessen werden. Auch die Messung der Innentemperatur ist durch den kleinen Durchmesser innen schwierig. Dies macht eine genaue Aussage, wie viel Wärme jeweils nach außen und nach innen abgestrahlt wird, schwierig.

5.3. Inbetriebnahme WUMS

Zur Inbetriebnahme der Wärmeübergangsmessstrecke wurden Versuche mit Wasser und Stickstoff durchgeführt. Beide Medien sind ungefährlich und daher einfach in der Handhabung. Stickstoff und Wasser haben den Vorteil über einen weiten Temperaturbereich eine relativ konstante Wärmekapazität zu besitzen.

Für Wasser und Stickstoff wurden die isobare Wärmekapazität aus dem Programm REFPROP entnommen. Die REFPROP Datenbank stellt thermophysikalische Eigenschaften wie Dichte, Dampfdruck oder Viskosität von vielen Fluiden oder Mischungen zusammen.

Die Messwerte wurden nicht mit dem Messdatenerfassungssystem aufgenommen, da bis zum Erreichen eines stationären Zustands einige Minuten vergingen. Daher wurden die Daten händisch erfasst.

Bei den Versuchen mit dem Inconel-Heizer bestand die Messstrecke aus einem Edelstahlrohr mit 3 mm Außendurchmesser mit 0,5 mm Wandstärke. Für den Versuch mit dem Keramik-Heizer, hatte das Rohr einen Außendurchmesser von 6 mm Rohr mit 1 mm Wandstärke.

5.3.1. Versuch mit Wasser

Versuch 1

Der erste Versuch wurde mit Wasser und dem Inconel-Heizer durchgeführt. Das Fluidsystem für Wasser besteht aus einem mit Stickstoff bedrückten Ku-

geltank, einem Schussventil und einer Rückschlagklappe (Abb.8.4.). Druck und Massenstrom in der Messstrecke wurde mit Hilfe eines Handdruckminderers, in der Stickstoffbedrückung und einem Nadelventil eingestellt. Wasser hat bis zum Siedepunkt eine nahezu konstante isobare Wärmekapazität. Bei einem Druck von 4,3 bar in der Messstrecke lag der Siedepunkt bei 146 °C.

Bei dem Versuch wurden jeweils die Fluidtemperatur im Zulauf und im Ablauf (T_Z und T_A), die Temperatur im Heizer innen und außen (T_{Hzi} und T_{Hza}) sowie die Außentemperatur des Rohrs (T_{Ra}) gemessen (Abb.8.1.).

Tabelle 5.1.: Temperaturen während Versuch 1 (Inconel-Heizer und Wasser); $\dot{m} = 0,3 \frac{\text{g}}{\text{s}}$; $p=4,3 \text{ bar}$

T_Z	T_A	ΔT	T_{Hzi}	T_{Hza}	T_{Wa}
[°C]	[°C]	[K]	[°C]	[°C]	[°C]
24	144	120	551	655	261

Aus Strom und Spannung lies sich die elektrische Leistung berechnen (Gl.5.1)

$$P = U \cdot I \quad (5.1)$$

Außerdem wurde der vom Fluid aufgenommene Wärmestrom errechnet (Gl.5.2). Die mittlere isobare Wärmekapazität war $c_p = 4,23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$.

$$\dot{Q}_{kal} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_A - T_Z) \quad (5.2)$$

Der vom Wasser aufgenommene Wärmestrom betrug 144 W

Tabelle 5.2.: Leistung und Wärmestrom bei Versuch 1 (Inconel-Heizer und Wasser); $\dot{m} = 0,3 \frac{\text{g}}{\text{s}}$; $p=4,3 \text{ bar}$, $c_p = 4,23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

U	I	P	\dot{Q}_{kal}
[V]	[A]	[W]	[W]
87,8	9,3	816,54	144

5.3.2. Versuche mit Stickstoff

Außerdem wurden Versuche mit Stickstoff durchgeführt. Es wurde dabei die Stickstoffleitung im Tank verwendet (Abb.8.3.).

Versuch 2

Der Versuch wurde mit dem Inconel-Heizer bei einem Massenstrom von $\dot{m}=1,3 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ und einem Druck von 5 bar in der Messstrecke durchgeführt. Eingestellt wurden diese Werte über den Druckminderer und das Nadelventil (vgl. 5.3.1).

Tabelle 5.3.: Temperaturen während Versuch 2 (Inconel-Heizer und Stickstoff); $\dot{m} = 1,3 \frac{\text{g}}{\text{s}}$; $p=5\text{bar}$

T_Z	T_A	T_{Hzi}	T_{Hza}	T_{Wa}
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
25	122	442	609	248

Tabelle 5.4.: Leistung und Wärmestrom Versuch 2 (Inconel-Heizer und Stickstoff) $\dot{m} = 1,3 \frac{\text{g}}{\text{s}}$; $p=5\text{bar}$, $c_p = 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

U	I	P	\dot{Q}_{kal}
[V]	[A]	[W]	[W]
77,6	8,24	639,4	132,2

In das Fluid konnte ein Wärmestrom von ca. 132W eingebracht werden.

Versuch 3

Versuch 3 wurde mit einem Keramik-Heizer und Stickstoff durchgeführt.

Tabelle 5.5.: Versuchsdaten Versuch 3, $c_p = 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

\dot{m}	p	ΔT	U	I	P	\dot{Q}_{kal}
$[\frac{\text{g}}{\text{s}}]$	[bar]	[K]	[V]	[A]	[W]	[W]
0,32	9	183,4	98,5	10,0	985,0	62,1
0,88	6,5	146	98,0	10,0	980,0	134,9

Bei einem Massenstrom von ca. $0,9 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ konnte ein Wärmestrom von ca. 134,9 W eingebracht werden.

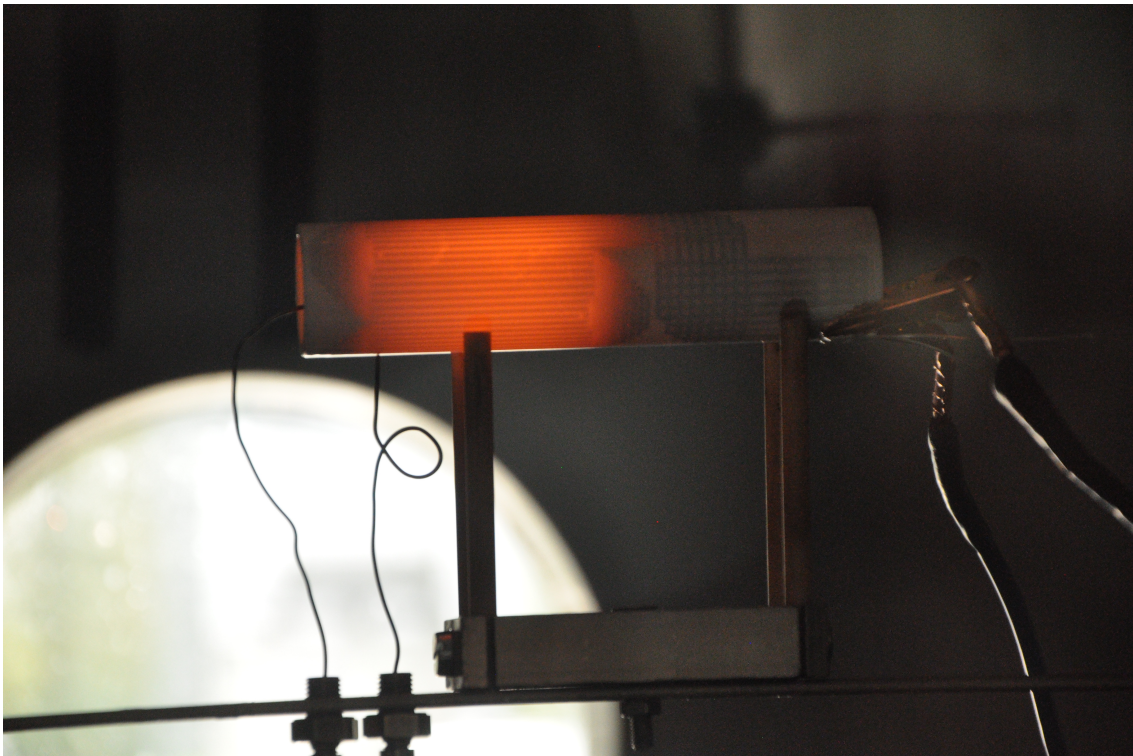


Abbildung 5.4.: Charakterisierung eines Keramik-Heizer

5.4. Charakterisierung der Heizer

Die Versuche zur Charakterisierung der Heizer wurden ebenfalls im Vakuum durchgeführt, um die Effekte der Konvektion zu minimieren.

Keramik-Heizer

Durch die konstante Temperaturverteilung, über die Heizzone, konnte innen und außen am Heizer eine Temperaturmessung erfolgen.

Herausforderung war die Anbringung der Thermoelemente. Das Thermoelemente musste so angebracht werden, dass es weder den Kontakt zum Heizer verlor, noch an der gekrümmten Oberfläche abrutschte (Abb. 5.4.). Eine Bohrung oder Körnung war durch die Keramik nicht möglich.

Abb. 5.5. zeigt die Temperaturverläufe innen und außen am Heizer. Es ist deutlich ein Temperaturunterschied zwischen innen und außen am Heizer zu erkennen. Die Differenz ist immer ca. 150 K.

Der Verlauf der Kurve ist nahezu linear, ebenso wie elektrische Leistung (Abb. 5.8.). Da es sich bei dem Heizer um einen Ohmschen Widerstand handelt kommt es zu keiner Phasenverschiebung und die elektrische Leistung errechnet sich aus Strom und Spannung.

In Abb. 5.6 ist der Widerstand über der Vorgabespannung aufgetragen, es

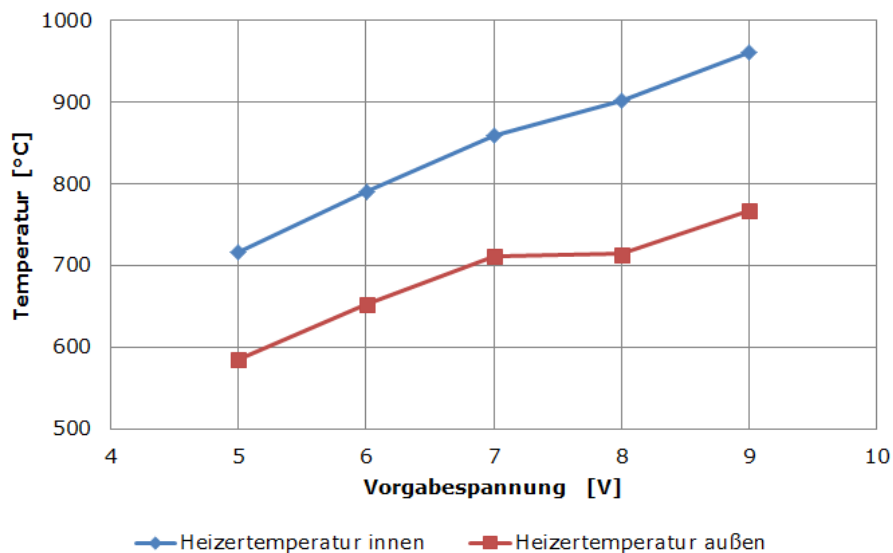


Abbildung 5.5.: Temperaturverlauf innen und außen an einem Keramikheizer über der Vorgabespannung bei 4 mbar Druck

ist deutlich die Kaltleitercharakteristik des Heizers erkennbar.

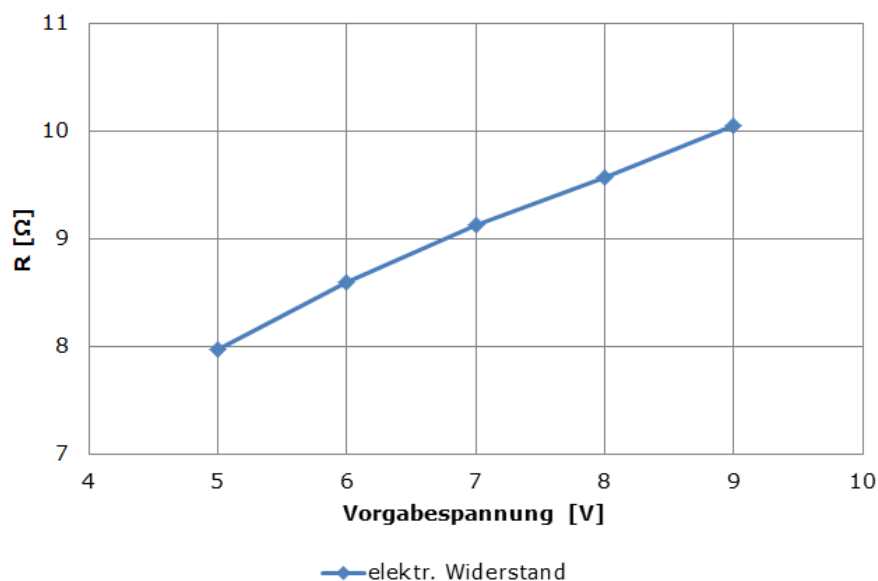


Abbildung 5.6.: Widerstandsverlauf über der Vorgabespannung eines Keramikheizers bei $p=4$ mbar

Kaltleiter sind Widerstände, die bei kälteren Temperaturen einen kleineren Widerstand und dadurch besser den elektr. Strom leiten, als bei Höheren.

Bei bekanntem Widerstand R_0 bei 20 °C, kann man mit dem Widerstand bei der jeweiligen Temperatur des Heizers die Temperatur berechnen.

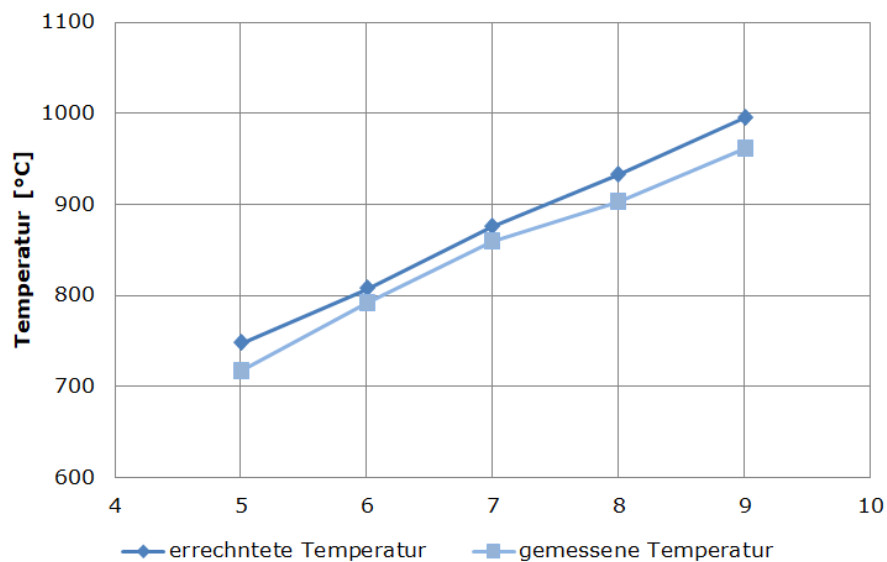


Abbildung 5.7.: Temperaturverläufe der errechneten und der gemessenen Temperatur eines Keramik-Heizers bei $p=4$ mbar

In Abb. 5.7 sind die errechnete Temperatur und die gemessene Temperatur aufgetragen. Der Fehler zwischen beiden ist relativ klein.

$$T = \frac{\frac{R_T}{R_0} - 1}{\alpha} + 20^\circ\text{C} \quad (5.3)$$

α ist der Temperaturkoeffizient, mit $\alpha = 0,0031 \frac{1}{\text{K}}$

Der Widerstand wird aus gemessenen Strom und Spannung errechnet.

$$R = \frac{U}{I} \quad (5.4)$$

Bei den Verläufen aus der errechneten und der gemessenen Temperatur lässt sich erkennen, dass die Temperaturdifferenz immer ca. 25 K beträgt. Dieser Unterschied könnte durch Kontaktverlust oder Verrutschen des Thermoelements kommen.

Die Streuung der Heizer untereinander kommt durch die unterschiedlichen Widerstände R_0 , die laut Hersteller um $\pm 0,3 \Omega$ variieren können. Da die Abweichung aber immer unter 50 W bleibt kann dies vernachlässigt werden (Abb. 5.8).

Dadurch können mehrere Keramik-Heizer parallel angeschlossen werden.

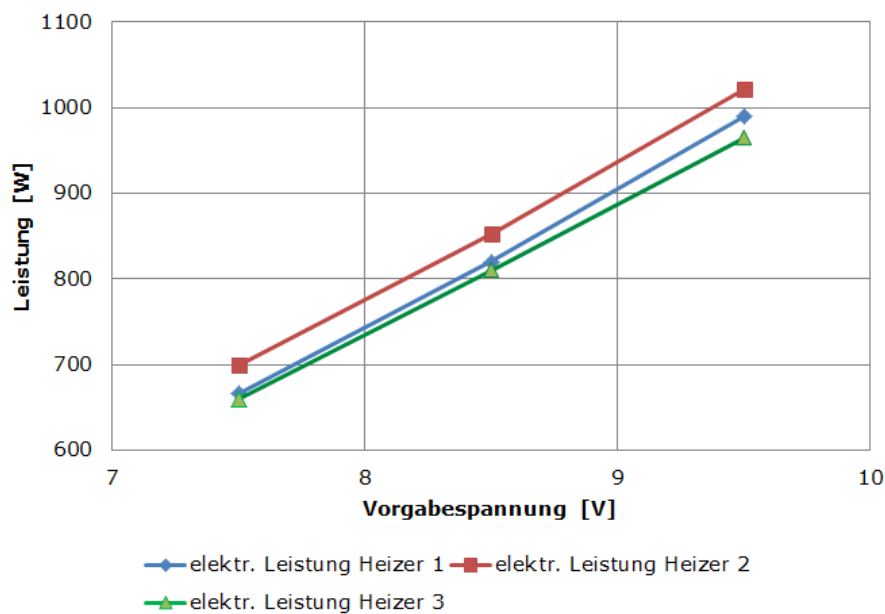


Abbildung 5.8.: Leistung drei verschiedener Keramikheizern über der Vorgabespannung bei 4 mbar

Inconel-Heizer

Bei dem Inconel-Heizern ist eine Charakterisierung wie bei den Keramik-Heizern nicht möglich. Da in der Heizzone keine konstante Temperaturverteilung vorliegt. Es kann, durch die Temperaturunterschiede an den Windungen, keine genaue Temperatur bestimmt werden, da nur ein Heizer bestellt wurde.

Schlussfolgernd lässt sich bei der Charakterisierung der Heizer sagen, dass nur beim Keramik-Heizer eine genaue Aussage über Temperaturverteilung und Wärmestrahlung getroffen werden kann.

Eine Parallelschaltung von Keramik-Heizern ist problemlos möglich, da sie gleiche Widerstandsverläufe und einen nahezu gleichen Widerstand R_0 besitzen. Da der Inconel-Heizer keine Kaltleitercharakteristik erkennen lässt, und daher einen anderen Widerstandsverlauf aufweist ist es nicht ratsam verschiedene Heizertypen parallel zu schalte. Es müssten komplizierte Umrechnungsfaktoren berücksichtigt werden.

6. Versuchsauswertung

6.1. Keramik-Heizer

Sichtfaktor

Beim Keramik-Heizer muss durch den großen Innendurchmesser ein Sichtfaktor berücksichtigt werden (siehe Kap.3.2.). Mit dem Sichtfaktor kann der Netto-Wärmestrom zwischen zwei Oberflächen berechnet werden. Anstelle der Lösung des Doppelintegrals, kann der Sichtfaktor in Sonderfällen durch analytische Verfahren errechnet werden.

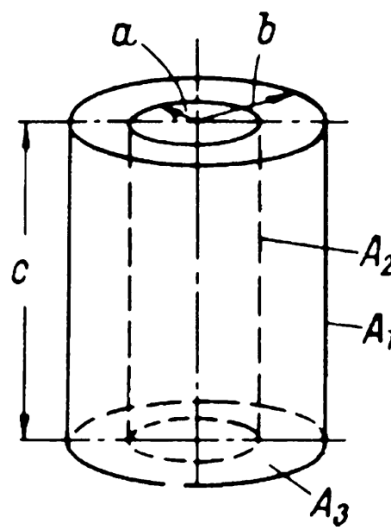


Abbildung 6.1.: Strahlung zwischen zwei konzentrischen Zylindern endlicher Länge [28]

Für zwei konzentrische Zylinder bzw. Rohre (Abb. 6.1.) kann der Sichtfaktor mit Hilfe von Diagramm 6.2 ermittelt werden. X stellt das Verhältnis zwischen den Radien der beiden Zylinder dar, Y das Verhältnis zwischen Länge und Radius des inneren Zylinders.

$$X = \frac{b}{a} \quad (6.1)$$

$$Y = \frac{c}{a} \quad (6.2)$$

a ist der Radius des inneren Zylinders, b der Radius des äußeren Zylinders und c die Länge.

Daraus folgt: $X = 3,81$ und $Y = 11,6$.

Aus Diagramm 6.2. wurde ein Sichtfaktor von $\varphi_{12} = 0,2$ abgelesen.

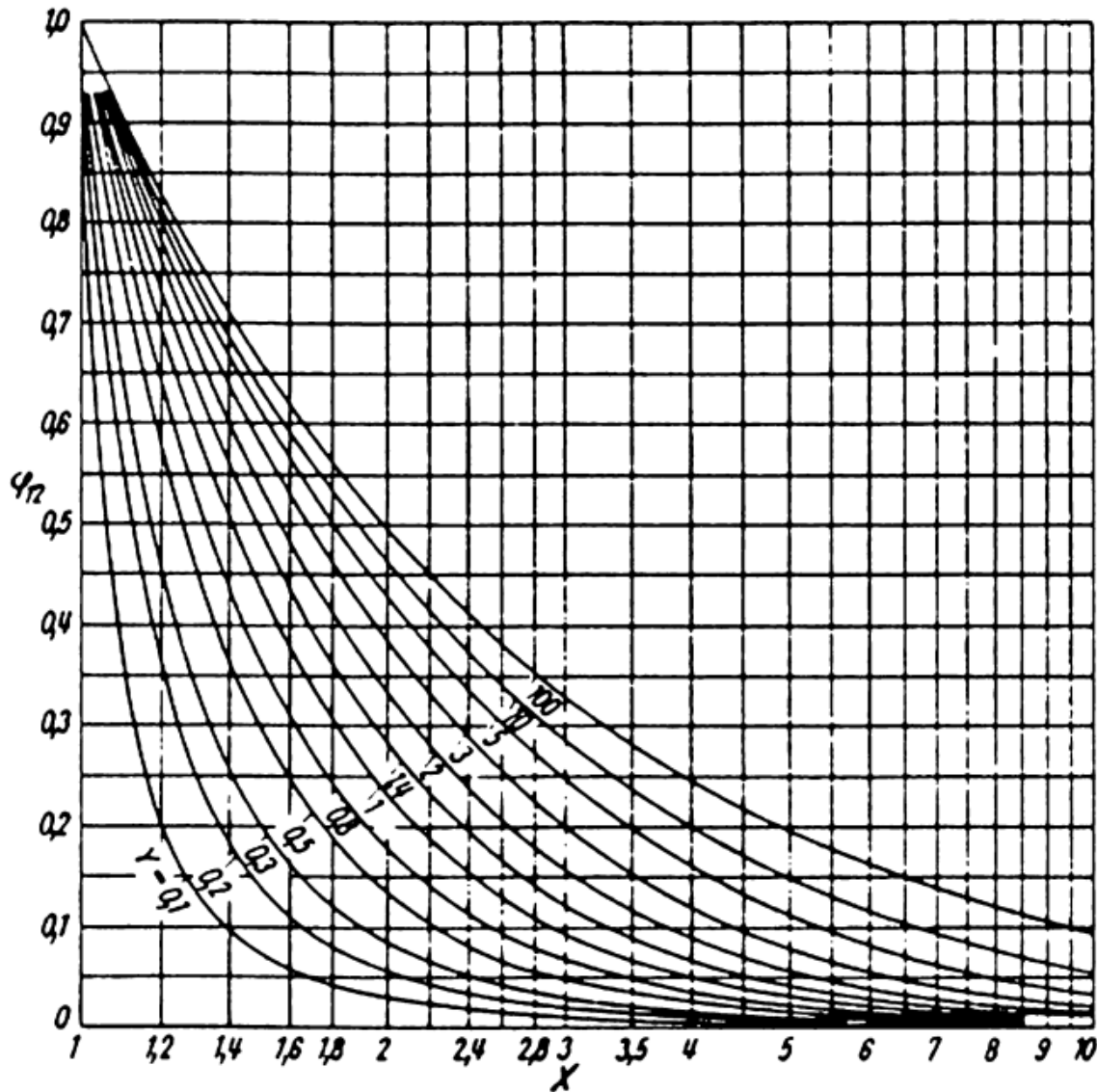


Abbildung 6.2.: Sichtfaktor φ_{12} der Strahlung des Außenzylinders auf den Innenzylinder in Abhängigkeit von X und Y [28]

\dot{Q}_{12} ist die gesamte Leistung, die vom Heizer ausgestrahlt wird. Sie wird mit dem Emissionsgrad $\epsilon = 0,8$ multipliziert. Dieser Wert wurde mittels der Wärmebildkamera bestimmt.

$$\dot{Q}_{12} = \epsilon \cdot P = 800W \quad (6.3)$$

Die, auf die Messstrecke eingestrahlte Wärme beträgt somit in Versuch 3

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_{12} \cdot \varphi_{12} = 160W \quad (6.4)$$

Wandinnentemperatur

Um den konvektiven Wärmeübergang im Rohr zu berechnen wird die Wandinnentemperatur benötigt.

Radiale Wärmeleitung in einem Rohr kann über folgende Gleichung berechnet werden:

$$\dot{Q}_{Lrad} = 2\pi \cdot l_R \cdot \lambda \left(\frac{T_{Wi} - T_{Wa}}{\ln\left(\frac{d_i}{d_a}\right)} \right) \quad (6.5)$$

d_i ist der Innendurchmesser, d_a der Außendurchmesser, T_{Wi} die Temperatur im Rohr innen, T_{Wa} die Temperatur außen und l_R die Länge des Rohrs. λ ist die Wärmeleitfähigkeit, bei Edelstahl ist $\lambda = 20 \frac{W}{mK}$.

Mit der Annahme, dass die gesamte auf das Rohr eingestrahlte Wärme nach innen geleitet wird, ergibt sich mit $\dot{Q}_{Lrad} = \dot{Q}_1 = 160 W$ und $T_{Wa} = 360^\circ C$ eine Wandinnentemperatur von $T_{Wi} = 352,62^\circ C$

Wärmeleitung im Rohr axial

Zur Berechnung der übertragenen Energiemenge in Form von Wärmeleitung in axialer Richtung, die über das Rohr verloren geht, wird als erste Näherung die Formel für Wärmeleitung in einer ebenen Wand hinzugezogen.

$$\dot{Q}_{ax} = \frac{\lambda}{l_1} (T_2 - T_1) \cdot A_R \quad (6.6)$$

Es wird angenommen, dass das Rohr nach 10 cm auf Raumtemperatur abgekühlt ist. Es folgt aus $T_{Wi} = 352,62^\circ C$ und der mittleren Wandtemperatur $T_{Wm} = 357^\circ C$, ein durch Wärmeleitung im Rohr verlorener Wärmestrom von $\dot{Q}_{LV} = 1,37 W$.

Man kann diesen Verlust weiter senken, zum Beispiel durch eine thermische Entkopplung durch Keramik nach den Verschraubungen für die Temperatur-/Druckmessung. In diesem Fall ist dieser Wert allerdings vernachlässigbar.

Tabelle 6.1.: Stoffwerte von Stickstoff für mittlere Bedingungen in der Messstrecke bei Versuch 3; 6,5 bar und 99°C

c_p	ρ	λ	η	ν
$\left[\frac{kJ}{kgK} \right]$	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\left[\frac{mW}{mK} \right]$	$\left[\frac{\mu Pa}{s} \right]$	$\left[\frac{cm^2}{s} \right]$
1,0485	5,8792	31,112	21,108	0,035903

Tabelle 6.2.: Versuchsauswertung Versuch 3

Q_i	T_{Wa}	T_{Wi}	Re	Pr	Nu	\dot{Q}_{err}	\dot{Q}_{kal}
[W]	[K]	[K]	[-]	[-]	[-]	[W]	[W]
160	360	352,6	13269	0,7114	38,89	69,1	134

Konvektion

Zur Berechnung des konvektiven Wärmestroms wurde die mittlere Temperatur zwischen Zu- und Ablauf verwendet. Sie beträgt für diesen Versuch $T_m = 99^\circ\text{C}$.

Reynoldszahl Die Reynoldszahl errechnet sich aus der Strömungsgeschwindigkeit, der kinematischen Viskosität und dem Durchmesser des Rohrs.

$$Re = \frac{v \cdot d_i}{\nu} = 13269 \quad (6.7)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit lässt sich aus Massenstrom, Dichte und Querschnittsfläche berechnen:

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} = 11,91 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (6.8)$$

Prandtlzahl Die Prandtl-Zahl ist eine Stoffgröße, sie fasst Wärmeleitfähigkeit, dynamische Viskosität und isobare Wärmekapazität zusammen.

$$Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} = 0,7114 \quad (6.9)$$

Nusselt-Zahl Die Nusselt-Zahl wird hier nach Dittus-Boelter berechnet. Gültig ist diese $0,7 \leq Pr \leq 160$, $Re > 10000$ und $\frac{l}{d}$.

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} = 39,89 \quad (6.10)$$

Konvektiver Wärmestrom

$$\dot{Q}_{err} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_i} (T_W - T_F) \cdot A = 69,1 \text{ W} \quad (6.11)$$

Im Vergleich zu dem kalorimetrisch gemessenen Wärmestrom ($\dot{Q}_{kal} = 134 \text{ W}$) ist dieser viel kleiner. Dieser Unterschied lässt sich durch die Reynoldszahl erklären. Durch die vielen Störungen in der Strömung muss diese deutlich höher sein, bei ungefähr $Re = 30000$.

Wärmestromdichte

Die Wärmestromdichte ist die, auf der auf eine Fläche bezogene Wärme.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}_{kal}}{A} = 101,6 \frac{kW}{m^2} \quad (6.12)$$

6.2. Inconel-Heizer

Bei dem Inconel-Heizer kann der Sichtfaktor nicht so einfach aus der Geometrie bestimmt werden. Während beim Keramik-Heizer die Dicke des Heizers vernachlässigt werden konnte, ist dies in diesem Fall nicht mehr möglich. Der Inconel-Heizer kann allerdings in erster Näherung durch das kleine Verhältnis zwischen Innendurchmesser des Heizers und dem Außendurchmesser des Rohrs im inneren als Schwarzkörper betrachtet werden. Es wird somit die gesamte Wärme, die nach innen abgestrahlt wird, auch vom Rohr aufgenommen.

6.2.1. Versuch 2

Tabelle 6.3.: Stoffwerte von Stickstoff für mittlere Bedingungen in der Messstrecke von Versuch 2; 4,3 bar und 73,5 °C

c_p	ρ	λ	η	ν
$[\frac{kJ}{kgK}]$	$[\frac{kg}{m^3}]$	$[\frac{mW}{mK}]$	$[\frac{\mu Pa}{s}]$	$[\frac{cm^2}{s}]$
1,0467	4,8521	29,387	20,03	0,041284

Die in den Versuchen gemessene Innentemperatur der Heizer konnte wegen des kleinen Durchmessers nicht im Bereich der Heizwendel gemessen werden. Es musste also eine T_{Wi} angenommen werden.

Daraus konnte über die Wärmestrahlung der nach innen abgestrahlte Wärmestrom berechnet werden. Die Wandinnen- und Wandaußentemperatur waren wegen der geringen Wandstärke identisch.

Die Berechnung der Reynolds-, Prandtl- und Nusselt-Zahl erfolgte wie in Versuch 1.

Wie bei Versuch 1 ist der errechnete konvektive Wärmestrom ($\dot{Q}_{Kerr}=31,2 W$) kleiner als der Gemessene (\dot{Q}_{kal}). Dies ist ebenfalls durch die in Wahrheit größere Reynoldszahl zu erklären.

Tabelle 6.4.: Versuchsauswertung Versuch 2

T_{Hi}	$T_{Wi}=T_{Wa}$	\dot{Q}_i	Re	Pr	Nu	\dot{Q}_{Kerr}	\dot{Q}_{kal}
[°C]	[°C]	[W]	[-]	[-]	[-]	[W]	[W]
700	248	175,6	41.323	0,716	98,35	31,2	132,2

Tabelle 6.5.: Stoffwerte von Wasser für mittlere Bedingungen in der Messstrecke in Versuch 1; 4,3 bar und 84°C

c_p	ρ	λ	η	ν
$[\frac{kJ}{kgK}]$	$[\frac{kg}{m^3}]$	$[\frac{mW}{mK}]$	$[\frac{\mu Pa}{s}]$	$[\frac{cm^2}{s}]$
4,1991	969,6	669,6	337,79	0,0034842

6.2.2. Versuch 1

Versuch 1 wurde mit Wasser durchgeführt. Die Berechnung der Wärmestrahlung nach innen und der Reynoldszahl erfolgte wie in Versuch 2.

Durch die hohe Dichte von Wasser ergab sich die Reynoldszahl zu $Re=562$. Die Strömung war demnach laminar, der Umschlag von laminar zu turbulent erfolgt, bei Rohrströmungen, bei $Re=2300$. Die Nusselt-Zahl für laminare Rohrströmung wurde aus der Literatur entnommen. Sie beträgt bei konstanter Wandtemperatur $Nu=3,657$.

Der daraus errechnete konvektive Wärmestrom betrug $\dot{Q}_{Kerr} = 204 \text{ W}$. Dieser Wert ist größer als der kalorimetrisch gemessene ($\dot{Q}_{kal} = 152,3 \text{ W}$).

Die Differenz kommt vermutlich daher, dass das Wasser in der Messstrecke

Tabelle 6.6.: Stoffeigenschaften von Wasser am Siedepunkt bei 146 °C und 5 bar

T	c_p	λ	ρ	η	ν
[°C]	$[\frac{kJ}{kgK}]$	$[\frac{mW}{mK}]$	$[\frac{kg}{m^3}]$	$[\frac{\mu Pa}{s}]$	$[\frac{cm^2}{s}]$
146,23	4,2974	681,71	920,5	187,66	0,0020387
146,23	2,3613	29,819	2,3149	13,832	0,059752

cke zu kochen begonnen hatte. Es hatte sich aber bis zu der Verschraubung mit der Temperaturmessung wieder etwas abgekühlt. Am Siedepunkt ändern sich die Stoffeigenschaften von Wasser (Tab.6.6.). Wasserdampf hat eine deutlich geringere isobare Wärmekapazität und eine um eine Größenordnung kleinere Wärmeleitfähigkeit.

Dadurch verschlechterte sich der Wärmeübergang in der Messstrecke deutlich.

Tabelle 6.7.: Versuchsauswertung Versuch 1

T_{Hi}	$T_{Wi}=T_{Wa}$	\dot{Q}_i	Re	Nu	\dot{Q}_{Kerr}	\dot{Q}_{kal}
[°C]	[°C]	[W]	[-]	[-]	[W]	[W]
800	261	178,3	562,5	3,657	212,4	152,3

6.3. Diskussion

Verluste durch Wärmeleitung Die Verluste durch Wärmeleitung sind mit 2 % der aufgenommenen Wärmestroms relativ gering. Eine thermische-Entkopplung, beispielsweise aus Keramik könnte die Verluste minimieren.

Reynoldszahl Bei beiden Versuchen mit Stickstoff musste die Reynoldszahl deutlich höher sein, als die berechnete. Dieser Unterschied kommt durch die vielen Störungen in der Messstrecke, wie zum Beispiel der Temperaturmessung oder den Verschraubungen. Es könnte durch geeignete konstruktive Maßnahmen versucht werden, diese Störungen zu minimieren.

Nusselt-Zahl Die Nusselt-Zahl wurde bei diesen Versuchen mit turbulenter Strömung durch die einfache Beziehung nach Dittus-Boelter berechnet. In Zukunft sollten noch andere Nusselt-Korrelationen untersucht werden.

Phasenwechsel Bei dem Versuch mit Wasser begann das Fluid in der Messstrecke zu kochen. Dadurch war der Wärmeübergang deutlich geringer als der theoretisch Berechnete. Da aber Lachgas und Ethan gasförmig untersucht werden sollen, spielt dies vorerst eine untergeordnete Rolle.

Wärmestrahlung der Heizer Bei den durchgeführten Versuchen wurde nur ein relativ kleiner Teil der aufgenommenen Leistung der Heizer auf die Messstrecke eingestrahlt. Beim Keramik-Heizer aufgrund des zu berücksichtigenden Sichtfaktor, beim Inconel-Heizer durch das große Verhältnis von Innen- und Außendurchmesser. Reflexionsspiegel könnten diesbezüglich Abhilfe schaffen. Die Wärme würde von diesen Spiegeln reflektiert und so doch nutzbar gemacht werden. Allerdings würden dadurch die Berechnungen erschwert werden.

Messung der Oberflächentemperaturen Die Messung der Oberflächentemperaturen innen und außen am Heizer und außen am Rohr stellte eine Schwierigkeit dar. Beim Inconel-Heizer konnte weder die Temperatur an den Heizwindungen gemessen werden, noch die Temperatur innen in der Heizzo-

ne. Ferner war die Messung der Temperatur des Rohrs schwierig, vor allem beim 3 mm Rohr. Es konnte weder angebohrt noch angekörnt werden. Mit dünneren Thermoelementen werden diese Messungen vermutlich einfacher.

7. Ausblick

Im Institut für Raumfahrtantriebe des DLR, in Lampoldshausen, wird an „Grünen Triebstoffen“ geforscht um das giftige und karzinogene Hydrazin zu ersetzen.

HyNOx-Treibstoffe sind diesbezüglich eine mögliche Alternative. Wegen der hohen Verbrennungstemperaturen müssen diese Triebwerke jedoch aktiv gekühlt werden. Tests mit Regenerativkühlung wurden bereits am Prüfstand M11 durchgeführt.

In Triebwerken sind Wärmeströme von vielerlei Faktoren abhängig, beispielsweise Brennkammerdruck, ROF oder Verbrennungstemperatur. Mit WUMS können diese Wärmeströme entkoppelt untersucht werden. Es kann bei einem bestimmten Wärmestrom, bei einem bestimmten ROF, bei einem bestimmten Massenstrom eingestellt werden. Auf diese Weise können experimentell strömungsphysikalische Parameter, wie Nusselt-Zahlen ermittelt werden.

Erkenntnisse aus diesen Versuchen sind bei der Auslegung und Konstruktion künftiger Triebwerke nützlich.

Als nächster Schritt kommen, nach Verbesserungen am Versuchsaufbau, detaillierte wissenschaftliche Untersuchungen zu Wärmeübergängen.

8. Anhang

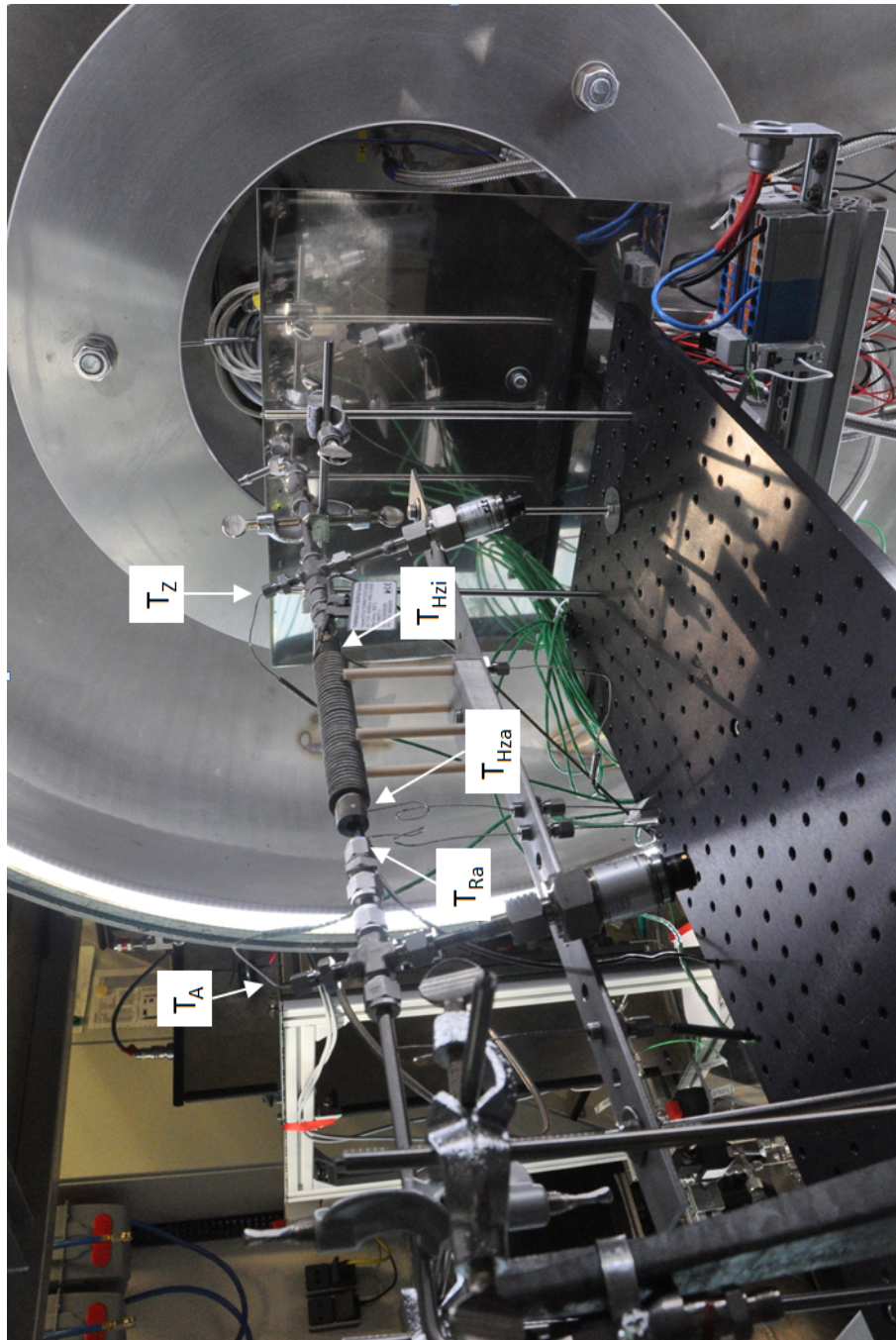


Abbildung 8.1.: Bezeichnung Thermoelemente WUMS

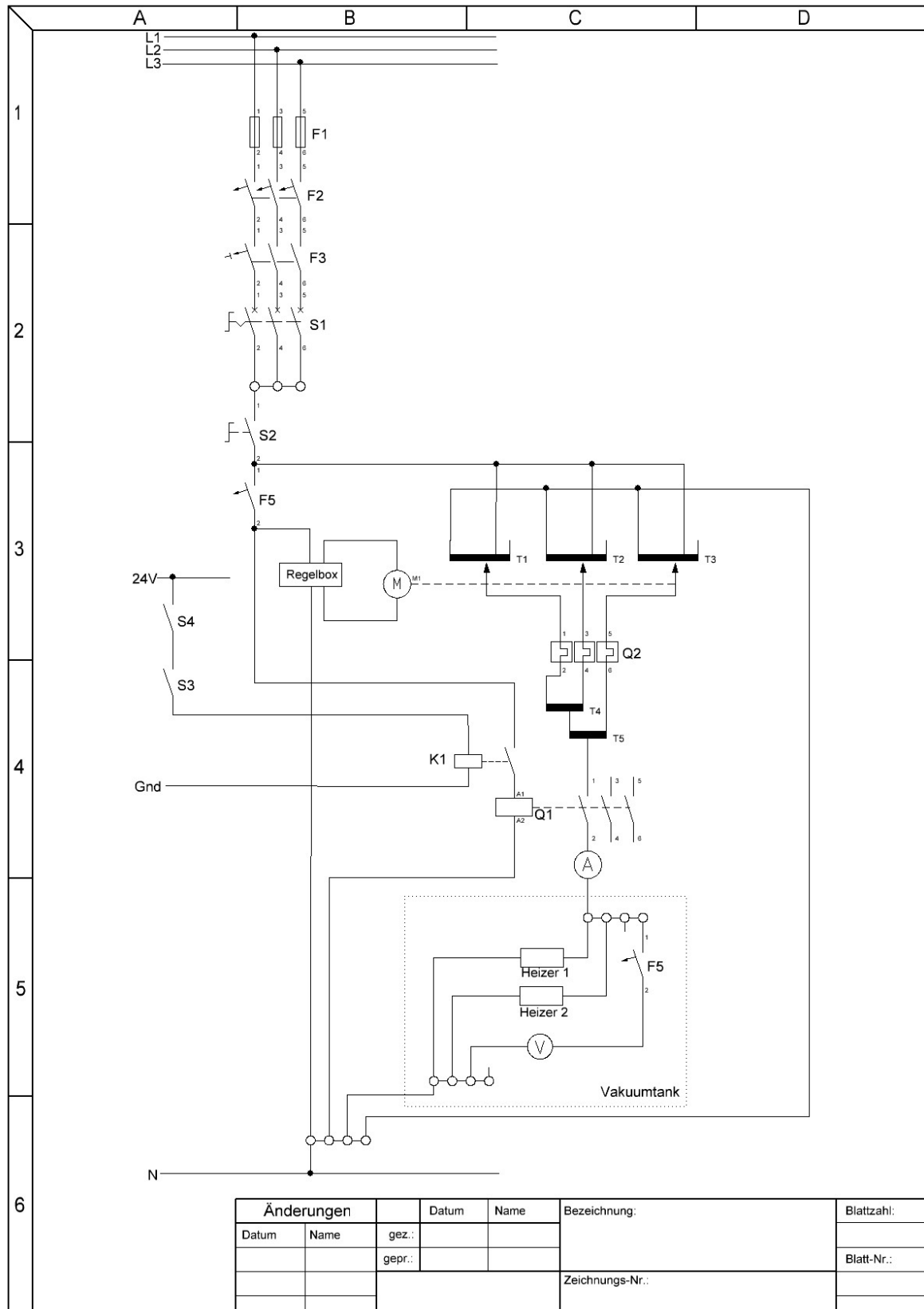


Abbildung 8.2.: Schaltplan

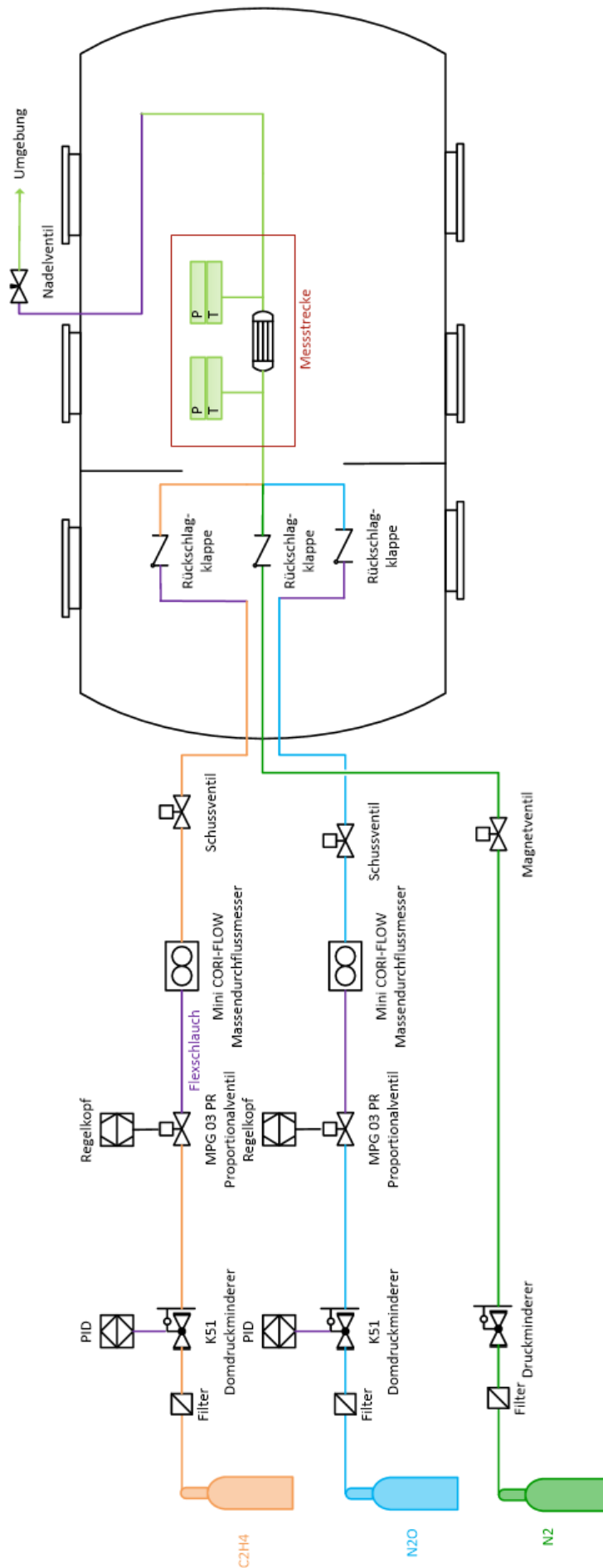


Abbildung 8.3.: Fluidplan

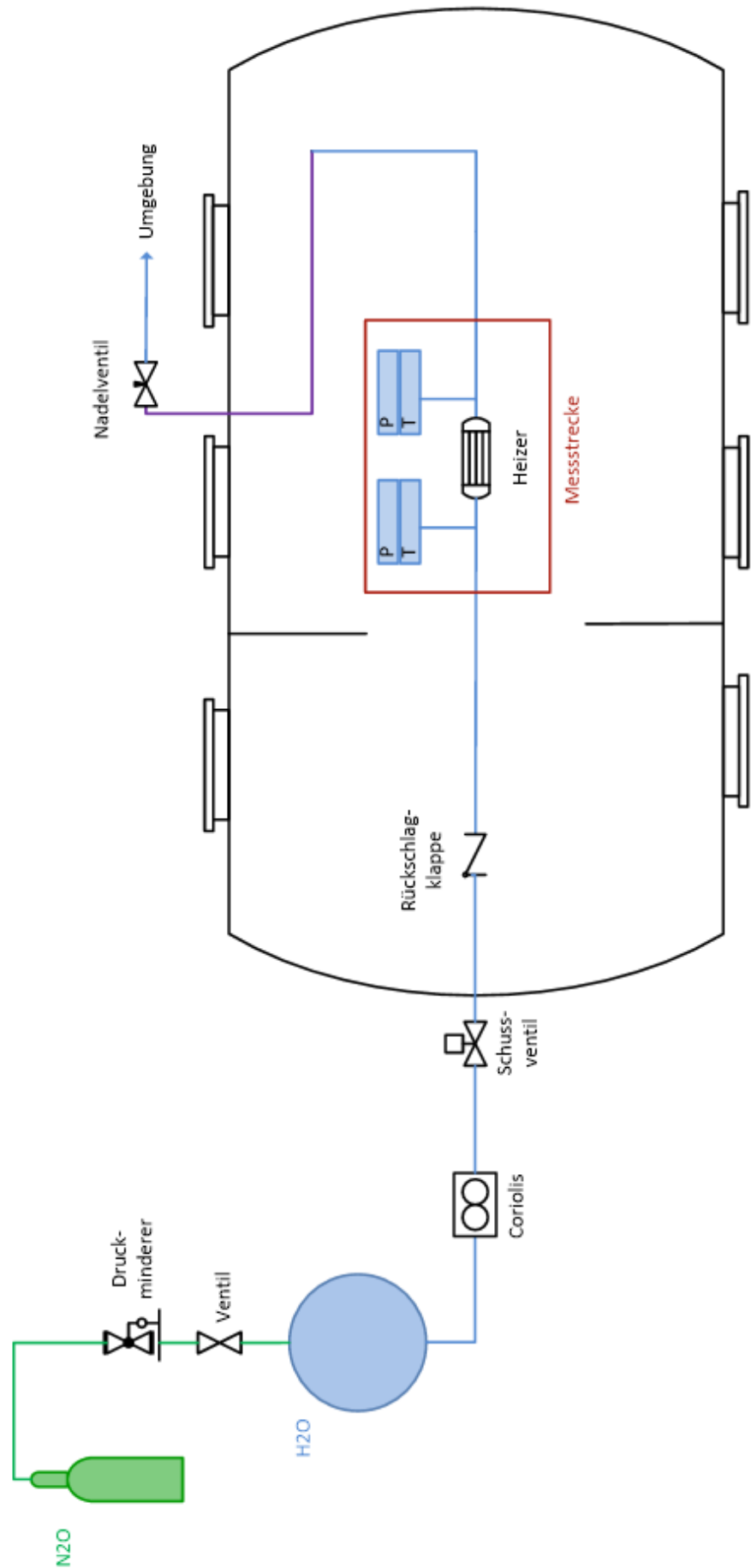


Abbildung 8.4.: Fluidplan mit Wasser

Copying of this document and giving it to others
and the use or communication of the contents thereof,
are forbidden without express authority. All rights reserved.

Weitergabe und Vervielfältigung dieser Unterlage, sowie Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Alle Rechte vorbehalten.

Projektionsmethode:

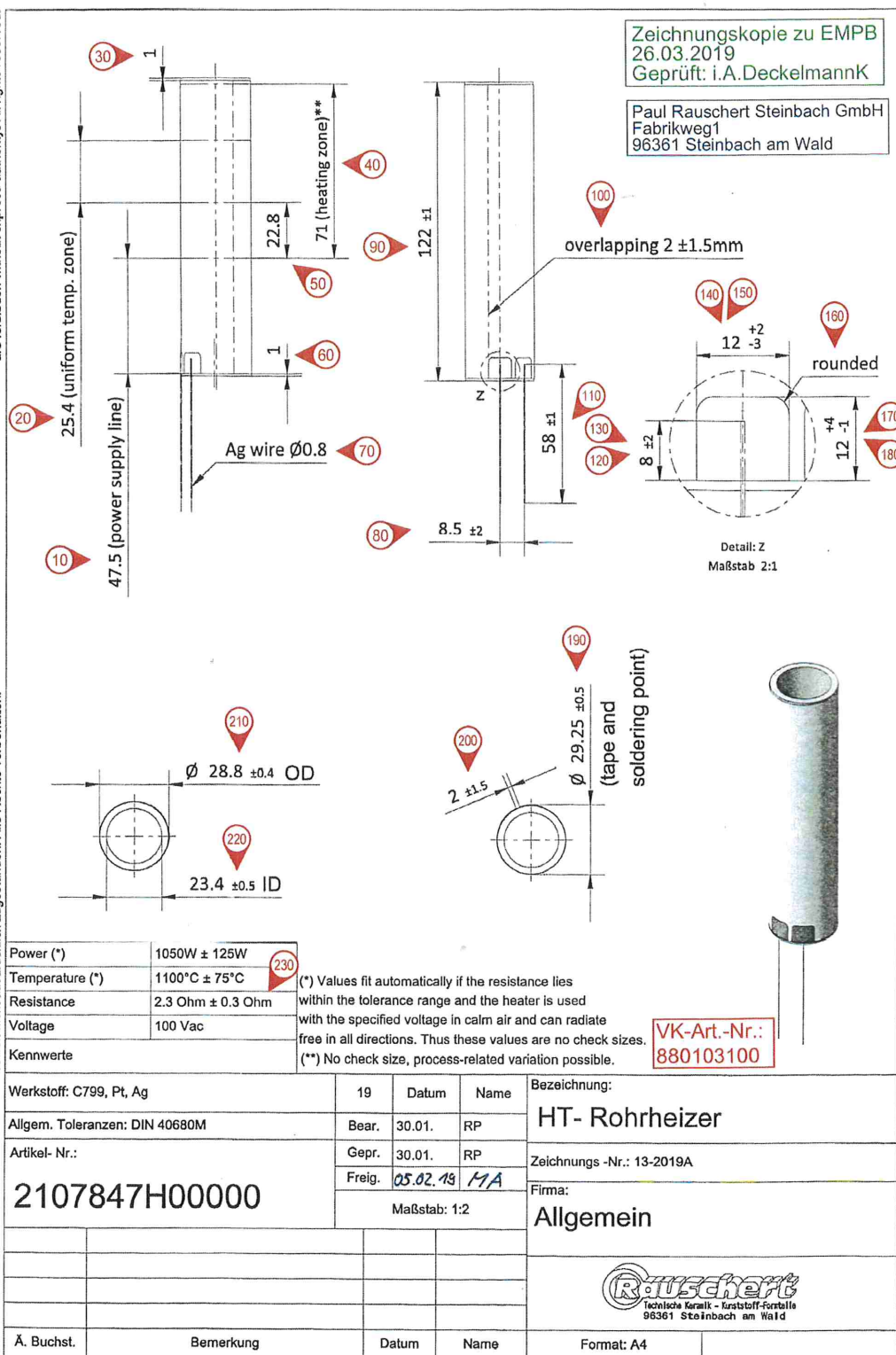
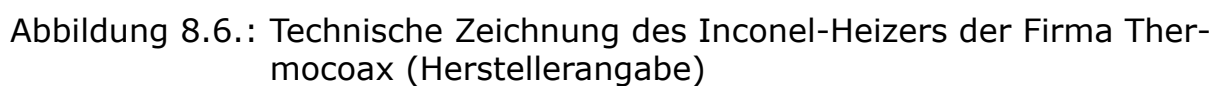


Abbildung 8.5.: Technische Zeichnung des Keramikheizer der Firma Rauschert (Herstellerangabe)



Literatur

- [1] Sutton, G. P. und Biblarz, O. (2010). *Rocket Propulsion Elements*. 8th ed., Hoboken, N.J: Wiley.
- [2] Crane, L. (2017). *NASA Fires Voyager 1's Engines for the First Time in 37 Years*. URL: <https://www.newscientist.com/article/2155460-nasa-fires-voyager-1s-engines-for-the-first-time-in-37-years/>.
- [3] (Spaceref) (21.04.2009). *Fueling of the Planck Spacecraft: ESA Science and Technology*. URL: <http://www.spaceref.com/news/viewsr.html?pid=31085>.
- [4] Waugh, I. *Testing of a Novel Nitrous-Oxide and Ethanol Fuel Blend*. In: 2018.
- [5] Ciezki, H. *Vorlesung Raketentreibstoffe*. Universität Stuttgart, 2014.
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. *DIN ISO 16290 Raumfahrtssysteme - Definition des Technologie Reifegrads (TRL) und der Beurteilungskriterien*.
- [7] Werling, L. K. u. a. *Experimental Performance Analysis (c^* & c^* Efficiency) of a Premixed Green Propellant consisting of N_2O and C_2H_4* . In: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference 2017. Red Hook, NY: Curran Associates Inc, 2017?, S. 22. ISBN: 978-1-62410-511-1. DOI: 10.2514/6.2017-5069.
- [8] Cervone, A. u. a. *Development of hydrogen peroxide monopropellant rockets*. In: 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2006, S. 5239.
- [9] Pasini, A. u. a. *Experimental Characterization of a 5 N Hydrogen Peroxide Monopropellant Thruster Prototype*. In: 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. [Reston, Va.]: [American Institute of Aeronautics and Astronautics], 2007, S. 1235. ISBN: 978-1-62410-011-6. DOI: 10.2514/6.2007-5465.
- [10] Werling, L. u. a. *Influence of Combustion Chamber Size (L^*) on Characteristic Exhaust Velocity (c^*) for a N_2O/C_2H_4 Premixed Green Propellant*. In: Space Propulsion Conference. 2018.
- [11] Gotzig, U. *Challenges and Economic Benefits of Green Propellants for Satellite Propulsion*. In: 7TH European conference for aeronautics and space sciences (EUCASS). 2015, S. 1–9.
- [12] Harmansa, N.-E. u. a. *Development of a Water Electrolysis Propulsion System for Small Satellites*. In: Conf. Paper: Space Propulsion Conference 2018. 2018.
- [13] Ide, Y. u. a. (2015). *Potential of ADN-based Ionic Liquid Propellant for Spacecraft Propulsion*. In: *Procedia Engineering*, 99, S. 332–337.
- [14] ECAPS. *Flight Proven High Performance Green Propulsion*. URL: http://ecaps.space/assets/pdf/Bradford_ECAPS_Folder_2017.pdf.

- [15] ECAPS (2017). *Another Six ECAPS Space Systems Comissioned Into Service*. URL: <http://ecaps.space/news2017-11-21.php>.
- [16] GESTIS-Stoffdatenbank. *Distickstoffmonoxid*. URL: http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates&fn=default.htm&vid=gestisdeu:sdbdeu.
- [17] GESTIS-Stoffdatenbank. *Ethan*. URL: http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates&fn=default.htm&vid=gestisdeu:sdbdeu.
- [18] Mayer, A. E. u. a. *European Fuel Blend Development for In-Space Propulsion*. In: Proc. of Space Propulsion Conf. 2018.
- [19] Messerschmid, E. und Fasoulas, S. (2017). *Raumfahrtsysteme*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [20] Greuel, D. *Untersuchungen zum Impuls- und Stofftransport in effusiv gekühlten faserverkeramischen Raketenbrennkammerwänden*. 2012.
- [21] Coulbert, C. D. (1964). *Selecting Cooling Techniques for Liquid Rockets for Spacecraft*. In: *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1, 2, S. 129–139.
- [22] Schlechtriem, S. *Vorlesung Chemische Raumfahrtantriebe*. Universität Stuttgart.
- [23] Esch, T. *Raumfahrtantriebe: Vorlesungsumdruck*. 2014.
- [24] Bartolome Calvo, J. und Hannemann, K. *Numerical Simulation of Liquid Rocket Engine Cooling Channels*. In: 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. [Reston, Va.]: [American Institute of Aeronautics and Astronautics], 2009, r93. ISBN: 978-1-60086-972-3. DOI: 10.2514/6.2009-5302.
- [25] Pizzarelli, M. (2017). *Regenerative Cooling of Liquid Rocket Engine Thrust Chambers*.
- [26] SCHWENDE, M., MUNDING, G. und SCHULTE, G. *Bi-Propellant Thruster Family for Spacecraft Propulsion*. In: 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 7061992. DOI: 10.2514/6.1992-3860.
- [27] Herwig, H. und Moschallski, A. (2019). *Wärmeübertragung*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [28] (2013). *VDI-Wärmeatlas*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [29] Baehr, H. D. und Stephan, K. (2010). *Wärme- und Stoffübertragung*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [30] Hörger, T. *Numerische und experimentelle Analyse der Wärmelasten auf eine N2O/C2H4 Green Propellant Brennkammer: Bachelorarbeit*. Bachelorarbeit. 2018.
- [31] Meyer, M. *Electrically Heated Tube Investigation of Cooling Channel Geometry Effects*. In: 31st Joint Propulsion Conference and Exhibit. 1995, S. 2500.

- [32] Smith, A. L., Cook, W. P. und Hlavin, V. F. (1956). *Coking of JP-4 Fuels in Electrically Heated Metal Tubes*. In:
- [33] Zhang, C. u. a. (2012). *Experimental Investigation on Heat Transfer of a Specific Fuel (RP-3) Flows Through Downward Tubes at Supercritical Pressure*. In: *The Journal of Supercritical Fluids*, 72, S. 90–99.
- [34] Maas, E. u. a. *A High Heat Flux Facility Design for Testing of Advanced Hydrocarbon Fuel Thermal Stability*. In: 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2004, S. 363.
- [35] N. Makarov, S., Ludwig, R. und Bitar, S. J. (2019). *Practical Electrical Engineering*, Cham: Springer International Publishing.
- [36] Häberle, G. D. u. a. (2018). *Tabellenbuch Elektrotechnik: Tabellen, Formeln, Normenanwendungen*. 28., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer GmbH & Co. KG.
- [37] Bumiller, H. u. a. (2018). *Fachkunde Elektrotechnik*. 31. überarbeitete und erweiterte Auflage, Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer GmbH & Co. KG.
- [38] Dzieia, M. u. a. (2018). *Elektronik Tabellen - Betriebs- und Automatisierungstechnik*. 3. Auflage, Braunschweig: Westermann.
- [39] Phoenix Contacts. *Prinzipien der Stromerfassung*. URL: https://www.phoenixcontact.com/online/portal/de?1dmy&urle=wcm%3apath%3a/dede/web/main/products/subcategory_pages/current_transducers_ac_dc_p-14-08-01/414d3de8-b7bb-4acf-b875-70ad304af361/414d3de8-b7bb-4acf-b875-70ad304af361.
- [40] Temperatur Messelemente Hettstedt GmbH. *Thermoelemente von TMH*. URL: <https://www.temperaturmesstechnik.de/de/produkte/thermoelemente.html>.
- [41] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2014). *Thermoelemente - Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen*.
- [42] m-tech. *Datenblatt Regelventil MPG 03 Pr*. URL: https://www.m-tech-gmbh.de/fileadmin/medien/gasabfuellsysteme/equipment/ventile/420bar/mpg_03_PR/MPG_03_PR_de.pdf.
- [43] DoroTEK. *Optische Materialien*. URL: <http://www.dorotek.de/cms/upload/pdf/optik/deutsch/1-GLAS.pdf>.

IX. Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig angefertigt, nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche wesentlich verwendete Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.

Nadine Stoll
Aachen, 26.11.2019